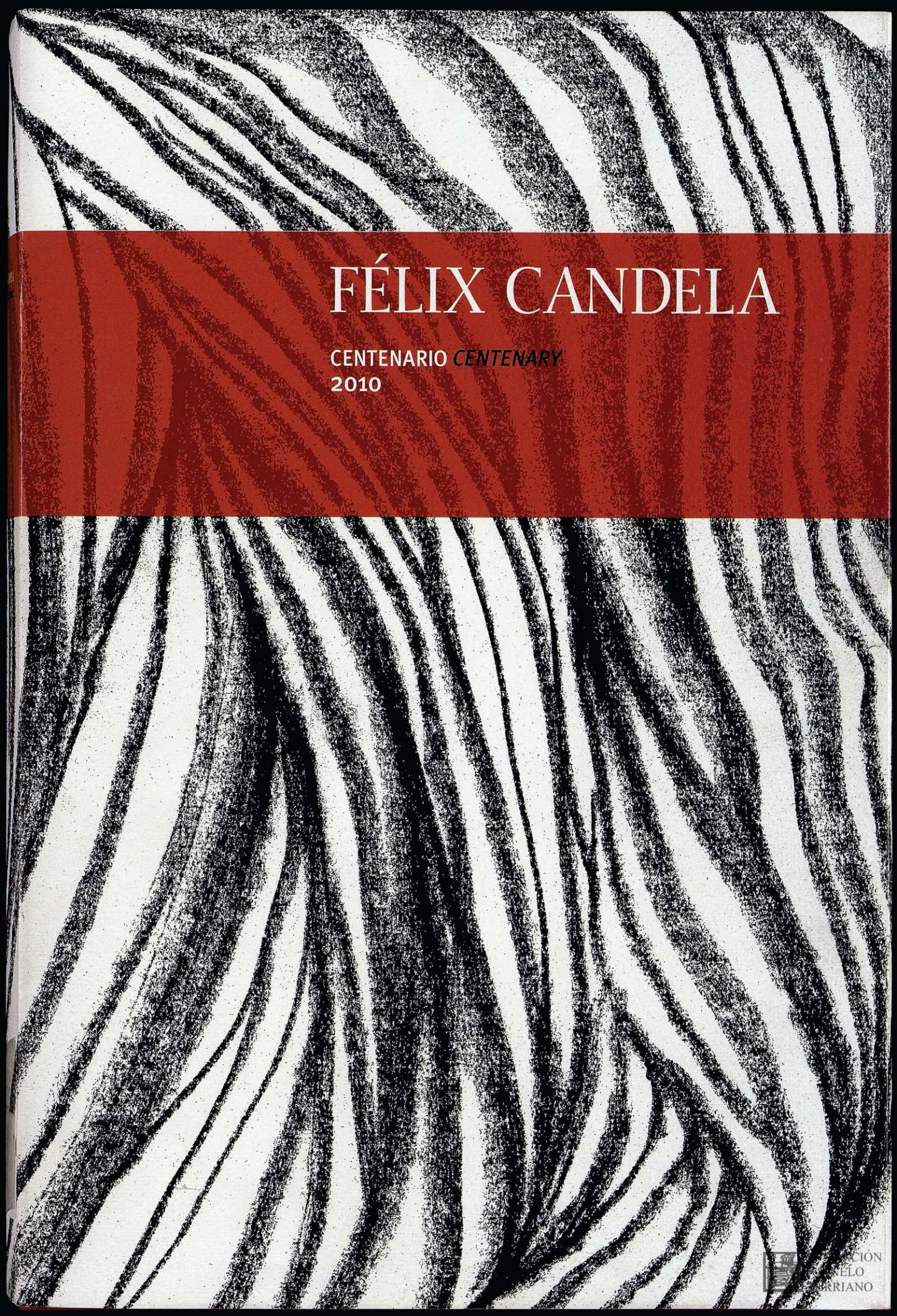
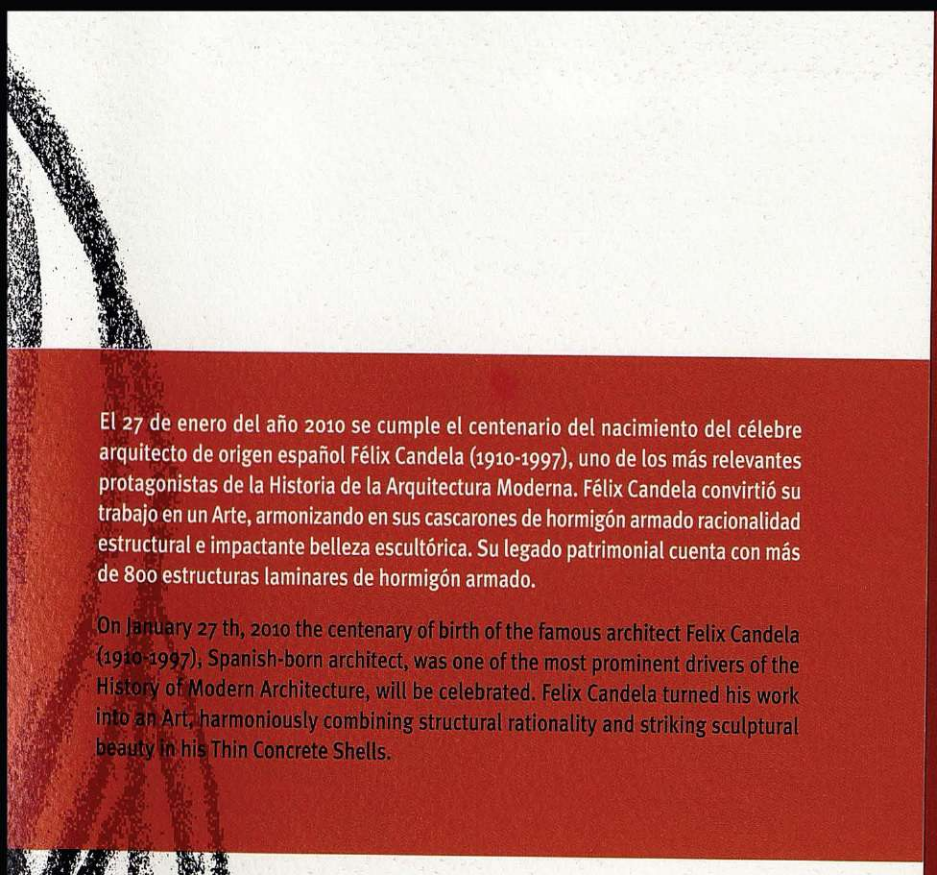


FÉLIX CANDELA

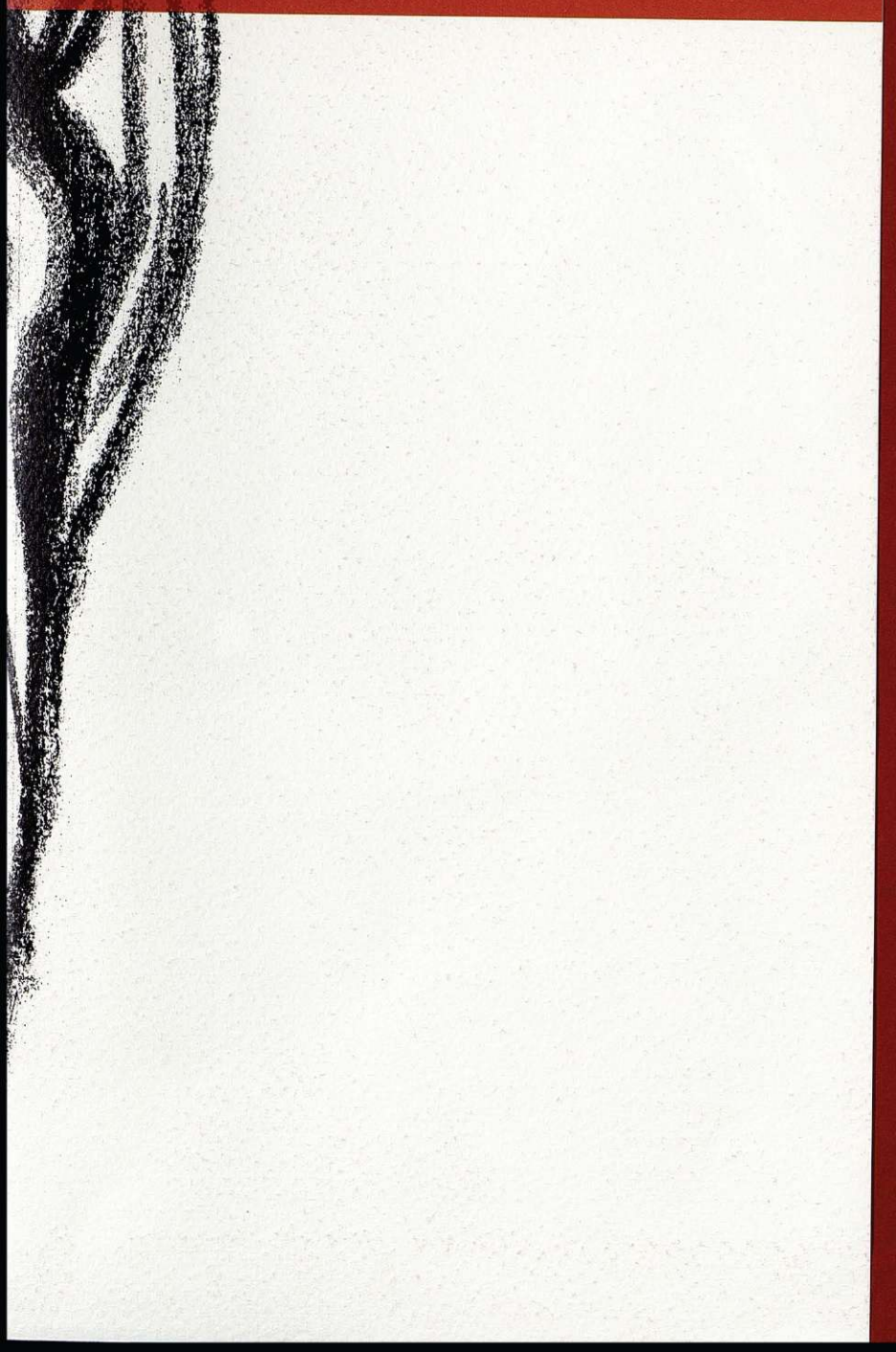
CENTENARIO *CENTENARY*
2010

...CIÓN
...ELO
...RRIANO



El 27 de enero del año 2010 se cumple el centenario del nacimiento del célebre arquitecto de origen español Félix Candela (1910-1997), uno de los más relevantes protagonistas de la Historia de la Arquitectura Moderna. Félix Candela convirtió su trabajo en un Arte, armonizando en sus cascarones de hormigón armado racionalidad estructural e impactante belleza escultórica. Su legado patrimonial cuenta con más de 800 estructuras laminares de hormigón armado.

On January 27 th, 2010 the centenary of birth of the famous architect Felix Candela (1910-1997), Spanish-born architect, was one of the most prominent drivers of the History of Modern Architecture, will be celebrated. Felix Candela turned his work into an Art, harmoniously combining structural rationality and striking sculptural beauty in his Thin Concrete Shells.



FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

R 5329

22/251

FUNDACION JUANELO TURRIANO
BIBLIOTECA

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Lola Álvarez Bravo © 1995 The University of Arizona Foundation

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO





Carment Pinart
Portada *Cover*

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

FÉLIX CANDELA

CENTENARIO *CENTENARY*
2010

LA CONQUISTA DE LA ESBELTEZ
THE ACHIEVEMENT OF SLENDERNESS

Pepa Cassinello
Editora *Editor*

POLITÉCNICA

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Exposición Centenario Félix Candela (1910-2010)

La conquista de la esbeltez The Achievement of Slenderness

ORGANIZAN

AYUNTAMIENTO DE MADRID

Alberto Ruiz Gallardón
Alcalde

Alicia Moreno Espert
Delegada Área de Gobierno de las Artes

Juan José Echeverría
Coordinador General de Infraestructuras Culturales

Belén Martinez Díaz
Directora General de Archivos, Museos y Bibliotecas

Carmen Herrero
Jefa del Departamento de Museos y Exposiciones

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Javier Uceda Antolín
Rector Magnífico

José Manuel Páez Borrallo
Vicerrector de relaciones internacionales

E.T.S. ARQUITECTURA

Luís Maldonado Ramos
Director

Pepa Cassinello
Subdirectora de Alumnos

E.T.S. INGENIEROS CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Juan Antonio Santamera Sánchez
Director

José Calavera Ruiz
Profesor Emérito

Enrique González Valle
Profesor

José Antonio Torroja
Profesor Emérito

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

PATRONATO

Victoriano Muñoz Cava
Presidente

Javier Goicolea Zala
Vicepresidente

Pedro Navascués Palacio
Secretario

José María Aguirre González
Carmen Becerril Martínez
José Calavera Ruiz
David Fernández-Ordoñez Hernández
Javier Rui-Wamba Martija
José Manuel Sánchez Ron
Vocales

Francisco Vigueras González
Presidente de honor

Bernardo Revuelta Pol
Director

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

His Excellency Alberto Ruiz-Gallardon
Mayor of Madrid

This year Madrid is celebrating the centenary of the birth of Felix Candela (1910-1997), an outstanding architect internationally acknowledged as one of the most prominent masters of modern architecture.

Like other illustrious Madrilenians, Candela was born and raised in the heart of the city. His parents had a shoe store on our Main Street and he attended Centro de Hijos de Madrid elementary school located in City Square. He later earned his baccalaureate at Cardinal Cisneros Institute on San Bernardo Street. In 1935 he graduated from the School of Architecture, today part of the city's Polytechnic University. Although most of his works were built abroad, where he sought exile after the Civil War, he erected two buildings in Madrid, Our Lady of Guadalupe Church in Berlin Park, and the "Puerta del Sol" underground station, in the very centre of the city.

Candela spent part of his career in Mexico, where he designed the Sports Stadium for the 1968 Olympic Games, among many other structures, and part in the United States. He was Harvard University's Charles Eliot Norton Lecturer in 1961-62 and moved to the U.S. permanently in 1971 after marrying American architect Dorothy Davies.

He was awarded many prizes throughout his long life in construction and belonged to numerous international architectural associations, in addition to presiding the international academy in 1992. In his latter years, Candela participated in projects such as the Sports City in Kuwait, the Marbella Fairgrounds, the Veracruz Parliament Building and the Office of Public Prosecutions at Xalapa. His last project was the City of Art and Science at Valencia, and more specifically its Oceanographic Centre, which he designed in conjunction with Santiago Calatrava.

Along with Pier Luigi Nervi, Candela was one of the innovative group of architects and engineers who formed part of the International Association for Shell Structures, IASS, founded by Eduardo Torroja in Madrid in 1959. This centenary, then, affords Madrid an excellent opportunity to rescue from oblivion the years of its international leadership during the golden age of Modernity. In that period, thanks to Eduardo Torroja, the world's leading specialist in concrete construction, our city was one of the hot points of scientific and technological innovation in the use of that material.

Madrid's City Hall has joined forces with the Polytechnic University, the Fundacion Juanelo Turriano and the other universities in Spain and abroad that are participating in our city's tribute to this distinguished architect, one of our most international Madrilenians. On the occasion of this centenary, we renew our commitment to disseminating his oeuvre as a significant part of Madrid's history, which comprises not only its streets, squares and monuments, but also the men and women to whose endeavour, determination and genius we owe them.

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Excmo. Sr. D. Alberto Ruiz-Gallardón
Alcalde de Madrid

Madrid celebra este año el primer centenario del nacimiento de Félix Candela (1910-1997), un sobresaliente arquitecto, reconocido a nivel internacional como uno de los más prestigiosos protagonistas de la arquitectura moderna.

Al igual que otros ilustres madrileños, Candela nació y creció en el corazón de esta ciudad. Sus padres regentaban una zapatería en la calle Mayor, y sus primeros estudios los realizó en el Centro de Hijos de Madrid, en la plaza de la Villa, estudiando posteriormente el bachillerato en el Instituto Cardenal Cisneros de la calle de San Bernardo. En 1935, se licenció en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, que hoy pertenece a la Universidad Politécnica. Aunque la mayor parte de su obra fue construida en el extranjero, donde se exilió tras la Guerra Civil, realizó dos obras en Madrid, la Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe, situada en el parque de Berlín, y la céntrica estación de metro de la Puerta del Sol.

Candela desarrolló su carrera entre México, donde diseñó el Palacio de los Deportes para los Juegos Olímpicos de 1968, entre otros muchos proyectos, y Estados Unidos. Allí presidió, de 1961 a 1962, la Charles Eliot Norton Lectures de la Universidad de Harvard, y se trasladó a vivir en 1971, tras casarse con la también arquitecta norteamericana Dorothy Davies.

A lo largo de su extensa trayectoria, ganó importantes premios y fue miembro de numerosas asociaciones internacionales de arquitectura, además de presidir su academia internacional, en 1992. En estos años, Candela participó en proyectos como los de la Ciudad Deportiva de Kuwait, la Feria de Muestras de Marbella, la Legislatura de Veracruz y la Procuraduría de Xalapa. Su último trabajo fue la Ciudad de las Artes y de las Ciencias de Valencia, que incluyó una gran parte del Oceanográfico, en cuya construcción participó también Santiago Calatrava.

Candela, al igual que el italiano Pier Luigi Nervi, perteneció también a ese innovador grupo de arquitectos e ingenieros que colaboraron con la International Association for Shell Structures, IASS, fundada por Eduardo Torroja en Madrid en 1959. Por ello, la celebración de este centenario es también un buen momento para que Madrid rescate del olvido el liderazgo internacional que mantuvo durante las décadas doradas de la modernidad. En estos años, nuestra ciudad, gracias a Eduardo Torroja, máximo especialista mundial de su tiempo en la construcción en hormigón, se convirtió en uno de los centros neurálgicos de la innovación científica y tecnológica en torno a este material.

El Ayuntamiento de Madrid, aunando esfuerzos con la Universidad Politécnica, la Fundación Juanelo Turriano y cuantas universidades nacionales y extranjeras se han querido sumar a esta efeméride, se convierte en el centro del homenaje a este insigne arquitecto, uno de nuestros madrileños más internacionales. De esta manera, y en el centenario de su nacimiento, apostamos por la difusión de su vida y su obra como parte relevante de la historia de Madrid, a la que no sólo pertenecen sus calles, plazas y monumentos, sino también los hombres y las mujeres que, con su esfuerzo, voluntad e ingenio, la han ido construyendo.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

His Excellency Javier Uceda Antolin

Vice-Chancellor of the Polytechnic University of Madrid

The Polytechnic University of Madrid, in conjunction with the Fundacion Juanelo Turriano, have undertaken to pay modest but highly deserved tribute to architect Felix Candela on the centenary of his birth. In the exhibition *Felix Candela: The Achievement of Slenderness*. His work is displayed as a model for today's generations.

Candela was born in Madrid on 27 January 1910. He began his university training at the Central University's Faculty of Science, and later enrolled in, and in 1935 graduated from, the Madrid School of Architecture, now part of the Polytechnic University of Madrid.

In addition to his universal oeuvre in the area of thin reinforced concrete shells, to which he owes his esteem in the realm of modern architecture, he was actively involved in university teaching from a very early age. While still a student himself, he worked as an aide to Luis Vegas, professor of "Materials and their properties."

Years later, in 1953, when he had earned international renown for his works, he was appointed professor of architecture with the National Autonomous University of Mexico. And in 1971 he accepted a full professorship from the University of Illinois at Chicago.

But the quality of his legacy, including over 800 thin concrete shells, most of which were built in Mexico in the nineteen fifties and sixties, affords him indisputable prominence in the history of modern architecture.

Throughout his lifetime, he was awarded many prizes, distinctions and acknowledgements, both for his architectural oeuvre and his publications and teachings. A few of the most renowned include the (British) Institution of Structural Engineers' gold medal, the Auguste Perret Prize from the International Union of Architects, and his designation as honorary member of both the International Association for Shell Structures and the American Concrete Institute. In 1994 he was awarded an honorary doctorate from the Polytechnic University of Madrid.

In light of the importance of Candela's oeuvre and the prestige of its author, the Polytechnic University of Madrid's Schools of Architecture and Civil Engineering, in conjunction with the Fundacion Juanelo Turriano, enthusiastically decided to commemorate the centenary of his birth with a series of initiatives, one of which is the present exhibition.

This tribute was conceived by a handful of people to whom I am most grateful, but many others, along with universities, institutions and all manner of organizations, have participated in its implementation. My sincere thanks to them all for the generous support that has made this initiative possible.

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Excmo. Sr. D. Javier Uceda Antolín
Rector de la Universidad Politécnica de Madrid

La Universidad Politécnica de Madrid, en colaboración con la Fundación Juanelo Turriano, quieren rendir un modesto y merecido homenaje al arquitecto Félix Candela en el centenario de su nacimiento, con la exposición *Félix Candela: La conquista de la esbeltez*. En esta exposición se mostrará su trabajo como ejemplo y referencia para nuevas generaciones.

Félix Candela nació en Madrid, el 27 de enero de 1910. Inició sus estudios universitarios en la Facultad de Ciencias de la Universidad Central, para después ingresar y terminar los estudios de Arquitectura en 1935 en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, hoy parte de la Universidad Politécnica de Madrid.

Al margen de su obra universal en el campo de las estructuras laminares de hormigón armado, que le convierten en un destacado protagonista de la Arquitectura Moderna, tuvo desde edad muy temprana una vocación por la docencia universitaria. Siendo todavía estudiante, en los últimos cursos, colaboró como ayudante del Prof. Luis Vegas en la asignatura de Resistencia de Materiales.

Años más tarde, en 1953, cuando ya gozaba de la fama internacional que le proporcionaban sus obras, fue nombrado profesor de Arquitectura en la Universidad Nacional Autónoma de México y más adelante, en 1971, catedrático de la Universidad de Illinois en Chicago.

Pero sin duda, la calidad del legado de su obra, integrado por más de 800 estructuras laminares de hormigón armado, la mayor parte construidas en México en los años 50 y 60, le convierten en un referente indiscutible de la Arquitectura Moderna.

En vida, recibió números premios, distinciones y reconocimiento por su obra arquitectónica, así como por sus publicaciones y enseñanzas. Entre ellos cabe destacar la Medalla de Oro de la Institution of Structural Engineers de Londres, el Premio Auguste Perret de la Unión Internacional de Arquitectos, la distinción como Honorary Member de la International Association for Shell Structures y el American Concrete Institute. En 1994 fue nombrado Doctor Honoris Causa por la Universidad Politécnica de Madrid.

Por la importancia de la obra y la categoría del personaje, la Universidad Politécnica de Madrid, a través de sus Escuelas Técnicas Superiores de Arquitectura y de Caminos Canales y Puertos, en colaboración con la Fundación Juanelo Turriano, nos decidimos a conmemorar de forma entusiasta el centenario de su nacimiento con un conjunto de iniciativas entre las que destaca la exposición que ahora les presentamos.

El homenaje es idea de unos pocos a los que quiero expresar mi reconocimiento, pero en su desarrollo han sido muchas las personas, universidades, instituciones y entidades de todo tipo que se han unido generosamente a esta iniciativa y la han hecho posible.

A todos ellos, muchas gracias.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Honorable Victoriano Muñoz Cava
President of the Fundacion Juanelo Turriano

Works of engineering ultimately become part of a society's legacy. But none would be possible without the contributions of great innovators able to solve problems and open up new horizons with the scant resources available to them, in whatever age.

Our foundation is devoted to the study of the history of science and technology. It takes its name from one such person, Juanelo Turriano, an Italian who worked in Spain during the reigns of Charles V and Philip II. Turriano was a Renaissance engineer who designed many civil works: among others, he raised the water of the Tagus River to the fortress in Toledo many metres above, much to the astonishment of friend and foe.

Further to this pursuit, i.e., highlighting the contributions of eminent engineers, the Fundacion Juanelo Turriano wishes to pay tribute to Felix Candela on the occasion of the centenary of his birth. The oeuvre of this distinguished Madrilenian – architect, engineer and builder – is little known in Spain, very likely because most of his works are located in North America. While exhibitions have already been held in his honour in the United States and Mexico, sponsored by Princeton University and the National Autonomous University of Mexico, respectively, Candela indisputably merited an entirely new showing under the foundation's auspices. The objective is to heighten awareness of his work in the city where he was born and where he trained to be an architect.

Juanelo Turriano and Felix Candela had two traits in common. On the one hand, both were inventors and builders: Turriano not only designed, but built, financed and exploited the device at Toledo that bears his name, while Candela also put his own vaulted designs to the test of actual construction. On the other, both practised their profession far from their places of birth, proving that creativity and ingenuity never have and never will be confined by national borders.

Lastly, the Fundacion Juanelo Turriano, always an enthusiast of institutional cooperation, is honoured to participate in this project with the Municipal Government and Polytechnic University, both of Madrid, and trusts that the endeavour will help to raise awareness of the rich legacy of one of the most eminent figures of twentieth century architecture and engineering.

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Ilmo. Sr. D. Victoriano Muñoz Cava
Presidente de la Fundación Juanelo Turriano

Las obras de ingeniería acaban convirtiéndose en legado y patrimonio de la sociedad. No hubieran sido posibles sin las aportaciones de grandes hombres, que supieron solucionar los problemas y abrir nuevos horizontes con los escasos medios disponibles en las diferentes épocas.

Nuestra Fundación, dedicada al estudio de la historia de la ciencia y la tecnología, adoptó el nombre de una de estas personalidades, Juanelo Turriano, un ingeniero italiano que trabajó en España durante los reinados de Carlos V y Felipe II. Turriano fue un renacentista de su tiempo que realizó múltiples proyectos; entre otros, logró elevar las aguas del río Tajo hasta el Alcázar de Toledo, con una obra que sorprendió a propios y extraños.

En esta línea de poner en valor las aportaciones de personalidades de la ingeniería, la Fundación Juanelo Turriano emprendió la iniciativa de recordar a Félix Candela con motivo del centenario de su nacimiento. La obra de este insigne madrileño, arquitecto, ingeniero y constructor es muy poco conocida en España; seguramente porque la mayor parte la desarrolló en América. De hecho, ya se han realizado exposiciones en Estados Unidos y México, a cargo de la Universidad de Princeton y la Universidad Autónoma Nacional de México. La indiscutible valía de Félix Candela merecía que la Fundación promoviese una exposición de nueva planta, para divulgar su obra en la ciudad que le vio nacer y donde cursó sus estudios de arquitectura.

Hay que resaltar dos coincidencias entre Juanelo Turriano y Félix Candela. La primera es su perfil de inventores y promotores. Turriano no sólo diseñó el Artificio de Toledo que llevó su nombre, sino que también lo construyó, lo financió y lo explotó. Candela fue también el constructor de las formas abovedadas que proyectó. La segunda coincidencia consiste en que ambos desarrollaron su obra lejos de los lugares donde nacieron y demostraron que nunca han existido, ni existirán, fronteras para la creatividad y el ingenio.

Por último, la Fundación Juanelo Turriano, que siempre ha creído en la cooperación institucional, se congratula de haber podido aunar esfuerzos con el Ayuntamiento y la Universidad Politécnica de Madrid para llevar este proyecto a buen puerto, que espera ayude a difundir el rico legado de una de las figuras señeras de la arquitectura e ingeniería del siglo XX.

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Índice
Index

18 INTRODUCCIÓN *INTRODUCTION*
PEPA CASSINELLO

20 HOMENAJE DE LA UNIVERSIDAD *UNIVERSITY HOMAGE*

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid
JUAN ANTONIO SANTAMERA SÁNCHEZ

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
LUIS MALDONADO RAMOS

24 EXPOSICIÓN CENTENARIO FÉLIX CANDELA (1910-2010)
EXHIBITION CENTENARY FELIX CANDELA (1910-2010)
PEPA CASSINELLO

ARTÍCULOS *ARTICLES*

TEMA 1 CONTEXTO INTERNACIONAL DE LAS *THIN CONCRETE SHELL*
INTERNACIONAL CONTEXT OF THE THIN CONCRETE SHELLS

61 Félix Candela en el contexto internacional de la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna: *Thin Concrete Shells*
PEPA CASSINELLO

111 Thin Concrete Shells and other Light-Weight Double-Curved Structures
MIKE SCHLAICH

TEMA 2 EL LEGADO DE FÉLIX CANDELA
FELIX CANDELA´S LEGACY

127 Felix Candela´s Legacy
MARIA EUGENIA MOREYRA GARLOCK, DAVID P. BILLINGTON

135 Félix Candela: su legado a México y al mundo
JUAN GERARDO OLIVA SALINAS

143 Felix Candela and the IASS
JOHN F. ABEL

149 Felix Candela: craftsman and precursor of contemporary technologies of thin concrete
AGOSTINO CATALANO

155 Felix Candela, Pier Luigi Nervi and the formalism in architecture
MASSIMILIANO SAVORRA

169 Félix Candela
ANTONIO LAMELA

177 Félix Candela. Colaboración con TYPSA en los años 80
PABLO BUENO

TEMA 3 FORMA ESTRUCTURAL, CÁLCULO Y CONSTRUCCIÓN
STRUCTURAL FORM, CALCULATION AND CONSTRUCTION

187 La intuición y el cálculo en Félix Candela, y algunos recuerdos
JOSÉ CALAVERA RUIZ

191 La forma estructural en la obra de Félix Candela
ENRIQUE GONZÁLEZ VALLE

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

201 Félix Candela: ingenieria y arquitectura bajo un mismo paraguas
Florencio J. del Pozo Vindel

209 El formalismo de Félix Candela
José María Goicolea

219 Félix Candela y Eladio Dieste, dos maestros
Gonzalo Larrambebere

229 Apoyar
Javier Manterola

239 Félix Candela y el Paraboloide Hiperbólico: forma estructural y forma visual
José Antonio Torroja

TEMA 4 GEOMETRÍA
GEOMETRY

249 La geometría inteligente
Carmen García Reig

TEMA 5 MATERIAL: HORMIGÓN ARMADO
MATERIAL: REINFORCED CONCRETE

273 Félix Candela Outeriño: secretos de la durabilidad de la obra
Rafael Talero

TEMA 6 FÉLIX CANDELA
FELIX CANDELA

295 La formación de Candela
Ricardo Aroca Hernández-Ros

299 Félix Candela, una mirada muy cercana
Antonia Candela Martín

305 Félix Candela: memoria y recuerdos
Julia Gómez Candela

315 Félix Candela: del hombre y su obra
Juan B. Artigas

325 Homenaje a Félix Candela
Fernando Serrano Migallón

329 La huella de Candela. La arquitectura con las estructuras
José Ávila Méndez

ANEXOS *ANNEX*

343 Selección de publicaciones de Félix Candela *Selected Publications by Felix Candela*

349 Selección de publicaciones sobre Félix Candela *Selected Publications about Felix Candela*

357 Selección de obras *Selected Works*

363 Félix Candela: reseña biográfica *Felix Candela: Biographical Brief*

368 AGRADECIMIENTOS *ACKNOWLEDGMENTS*

370 CRÉDITOS *CREDITS*

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO


JUANELO
TURRIANO

INTRODUCCIÓN
INTRODUCTION

PEPA CASSINELLO

HOMENAJE DE LA UNIVERSIDAD
UNIVERSITY HOMAGE

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid
JUAN ANTONIO SANTAMERA SÁNCHEZ

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
LUIS MALDONADO RAMOS

EXPOSICIÓN CENTENARIO FÉLIX CANDELA (1910-2010) LA CONQUISTA DE LA ESBELTEZ
EXHIBITION CENTENARY FELIX CANDELA (1910-2010) THE ACHIEVEMENT OF SLENDERNESS

PEPA CASSINELLO

Iglesia de la Medalla de la Virgen Milagrosa
Narvarte, México, 1953

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Introduction

This book pursues a dual objective. It aims, firstly, to serve the conventional purpose of presenting and cataloguing the commemorative exhibition organized on the occasion of the first centenary of Felix Candela's birth (1910-1997). The exhibition itself is the result of efforts made in his native Madrid to pay tribute to one of the most prominent international participants in Modern Architecture's Thin Shell Adventure. That highly venerated landmark in the history of twentieth century construction is regarded to be the epitome of the slogan "less is more."

The Municipal Government of Madrid, the city's Polytechnic University and the Fundación Juanelo Turriano have joined forces in this exhibition to heighten public awareness of the exemplary oeuvre and teachings of this illustrious Madrilenian architect. In so doing, they aspire to contribute to the living memory of one of the capital's most eminent citizens.

But more than that, in light of the international significance of Candela's legacy, this book has a broader ambition: to compile in its pages a varied, extensive and international analysis of his oeuvre through the plural vision of professionals engaging in architecture, engineering or teaching these disciplines. Candela himself, master and builder of thin reinforced concrete shells, merged those three endeavours in one with singular skill, erasing the historic divisions that arose when philosophy was split into the branches of learning that form today's common trunk of knowledge.

For this reason, the book consists in two distinct parts. One covers the content and objectives of the commemorative exhibition organized in Madrid under the sub-title *The Achievement of Slenderness*. The other, much broader, contains 24 articles grouped under six themes that aim to provide the reader with a kaleidoscope of ideas around the life and work of this distinguished architect, translated into pictures and words that reflect a plurality of knowledge. Highlighting that scholarship is a stroke or two of the inevitably fond colour of memories of the man behind the work cherished by family and friends.

The analysis of the international context in which Modern Architecture's Thin Shell Adventure took place and Candela's appearance on that scene are the point of departure from which this series of articles celebrates the significance and importance of his legacy. It specifically addresses the essential aspects of his oeuvre: the structural forms, engineering systems and construction processes used, the alluring nude geometry of his works and the properties of mid-twentieth century reinforced concrete, along with a few notes on Candela's life and personality traits. But despite its ambitious subject matter, which could certainly have been expanded to cover many other pertinent aspects and opinions, what affords this book particular interest is that many of its articles have been authored by some of the world's most outstanding contemporary architects and engineers, and professors of contemporary architecture and engineering.

Pepa Cassinello
Editor

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Introducción

Este libro nació con un dual objetivo. El primero de ellos, tal y como es habitual y perceptivo, el de servir de presentación y catálogo de la exposición conmemorativa del primer centenario del nacimiento de Félix Candela (1910-1997). Una exposición que es el resultado del esfuerzo realizado en Madrid, su ciudad natal, para rendir homenaje a uno de los más relevantes protagonistas internacionales de "la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna", ese venerado hito de la Historia de la Construcción del siglo XX, que es reconocido como la máxima expresión de su propio lema *"Less is More"*.

A través de esta exposición y aunando esfuerzos, el Ayuntamiento de Madrid, la Universidad Politécnica y la Fundación Juanelo Turriano, han apostado por la difusión de la ejemplarizante obra y enseñanzas de este ilustre arquitecto madrileño, contribuyendo a mantener vivo el recuerdo de uno de sus máximos referentes.

Pero además, dada la relevancia internacional del legado patrimonial de Félix Candela, este libro nació con una vocación más amplia, la de aglutinar en sus páginas, un variado, amplio e internacional análisis de su obra, a través de la plural visión de diferentes profesionales de la arquitectura, la ingeniería y su enseñanza. Tres disciplinas que Félix Candela, constructor y maestro de "cascarones de hormigón armado", fundió en una sola, con singular maestría, disipando las históricas dicotomías surgidas tras la escisión de la Filosofía en las diferentes ramas y disciplinas que hoy forman el tronco común del conocimiento.

Por esta razón, el libro tiene dos partes claramente diferenciadas, una referente al contenido y objetivos de la exposición conmemorativa, inaugurada en Madrid bajo el lema *La Conquista de la Esbeltez*, y otra, mucho más amplia, en la que a través de 24 artículos agrupados en 6 temas diferentes, se ha pretendido ofrecer al lector un variado tejido de pensamientos traducidos en imágenes y palabras, teñidas del color de la pluralidad del conocimiento, y acompañadas por unas pinceladas de esa inevitable ternura que evocan los recuerdos aportados por algunos de sus familiares y amigos más cercanos.

A través del conjunto de estos artículos, y partiendo del análisis del contexto internacional en el que se produjo "la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna" y la aparición en escena de Félix Candela, se pone de manifiesto el significado y relevancia de su legado, pormenorizando de manera específica los aspectos fundamentales de su obra: la forma resistente, los sistemas de cálculo y procesos de construcción empleados, la geometría de sus atractivas y desnudas formas, las características del hormigón armado en aquellos momentos, así como algunas vivencias y matices de la personalidad de Félix Candela. Pero sin duda, pese a la ambiciosa temática abarcada, en la que siempre tendrían cabida otros muchos aspectos y opiniones interesantes, el hecho que confiere mayor interés a las páginas de este libro, es que gran parte de la autoría de sus palabras impresas pertenece a algunos de los más destacados profesionales de la arquitectura, la ingeniería y su contemporánea enseñanza a nivel internacional.

Pepa Cassinello
Editora

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

University Homage

Next 27 January 2010 is the 100th anniversary of the birth of Felix Candela, one of modern architecture's most renowned and prolific builders of thin concrete shells, with a legacy that includes over 800 such structures.

Although he graduated from Madrid's School of Architecture in 1935, he is internationally known not only as an architect. Rather, he is also highly reputed as an engineer and builder, the result of his self-acquired acumen in the structural engineering and construction of the shell-like forms that embodied the fancies of the world of architecture and engineering in the golden years of Modernity.

Candela was a member of one of the generations of Spanish architects and engineers who had the good fortune to train at a time when reinforced and prestressed concrete were still under development, and when Spain, under the leadership of Eduardo Torroja, would play a significant role in this technological adventure. Some of the most admired and innovative shells built while Candela was still a student in the nineteen thirties were authored by Torroja: the market at Algeciras (1934), Madrid's Zarzuela Racetrack (1935) and the Recoletos Jai-alai Court (1935) (since demolished). Candela felt particularly drawn to these works, which he had the opportunity to come to know first-hand. As he himself recalled in his investiture speech on the occasion of his honorary doctorate from the Polytechnic University of Madrid in 1994, this familiarity whetted his desire to create thin concrete shells.

At the end of the Spanish Civil War in 1939, Candela sought exile in Mexico. Soon after he founded his own construction company, Cubiertas Ala, in that country in 1950, he became one of the world's most admired creators of thin shells. In two decades, he built the largest number of thin concrete shells ever erected by one man. But more than that, with his structural expertise and creative sensitivity as allies, he turned them into veritable works of art.

Frei Otto: "... it took Felix Candela to make an art out of building thin concrete shells."

The School of Civil Engineering of the Polytechnic University of Madrid is participating in this exhibition in commemoration of the first centenary of the birth of Felix Candela with the deliberate aim of raising public awareness of his splendid legacy.

Honorable Juan Antonio Santamera Sanchez
Director of the Superior Technical School of Civil Engineering of Madrid

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Homenaje de la Universidad

El próximo 27 de enero de 2010 se cumple el primer centenario del nacimiento de Félix Candela, uno de los más célebres constructores de estructuras laminares de la Arquitectura Moderna, a la que legó un innovador conjunto de más de 800 cascarones de hormigón armado.

Aunque se licenció como arquitecto en 1935, en la actual Universidad Politécnica de Madrid, es sin embargo reconocido a nivel internacional como arquitecto, ingeniero y constructor, debido a su específica autoformación en el diseño estructural y construcción de las nuevas formas laminares, que protagonizaron los anhelos del mundo de la Arquitectura y la Ingeniería, en las doradas décadas de la Modernidad.

Félix Candela perteneció a una de las generaciones de arquitectos e ingenieros españoles que tuvieron el privilegio de formarse en unos especiales momentos en los cuales el hormigón armado y pretensado estaban todavía en pleno desarrollo, cuando España, a través de Eduardo Torroja, estaba ya destinada a protagonizar, en gran medida, esta aventura tecnológica. Algunas de las más admiradas e innovadoras estructuras laminares construidas en la década de los años 30, cuando Félix Candela era estudiante, las construyó Eduardo Torroja: el Mercado de Algeciras (1934), el Hipódromo de la Zarzuela de Madrid (1935) y el desaparecido Frontón Recoletos de Madrid (1935). Obras que Félix Candela tuvo la oportunidad de conocer de cerca, y por las que se vio especialmente atraído, incrementándose su interés e ilusión por capacitarse para crear cascarones de hormigón armado, tal y como él mismo recordó en su investidura como Doctor Honoris Causa en la Universidad Politécnica de Madrid en el año 1994.

A partir de 1950, en el que fundó en México su propia empresa constructora, Cubiertas Ala, Félix Candela se convirtió en uno de los más admirados creadores de estructuras laminares. Durante dos décadas, no sólo construyó la mayor cantidad de cascarones de hormigón armado jamás construida por un solo hombre sino que, además, sus conocimientos estructurales y sensibilidad creadora le permitieron convertirlos en verdaderas obras de Arte.

Frei Otto: "... sólo Félix Candela ha sabido convertir la construcción de los cascarones de hormigón armado en un Arte".

La Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid ha participado en este homenaje al primer centenario del nacimiento de Félix Candela, con el claro objetivo de contribuir a la difusión de su relevante legado.

Ilmo. Sr. D. Juan Antonio Santamera Sánchez
Director de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

In 1844, the San Fernando Royal Fine Arts Academy segregated architectural training from painting and sculpture. That separation initiated an irreversible trend towards the independence of the discipline and, ultimately, the institution of the Madrid School of Architecture, which would soon become one of the country's most outstanding educational and cultural centres.

For well over thirty years, all the Spanish architects of the day trained at the Madrid School, whose prestige and excellence grew throughout the twentieth century and remain intact today. Its students have a characteristic profile, for they are taught from the outset to be demanding and responsible but at the same time imaginative. The teaching staff, in turn, is in possession of experience and continuity, tradition in the most positive sense of the word, which is difficult to find in any other school if for no other reason than the long history behind the Madrilenian institution.

Felix Candela was a typical graduate of this school: innovative, daring, but technically skilful and imbued with the essence of the tradition and humanism that should lie at the core of any architect's endeavour. At the same time, he is a model for the new generations of students, for his talent and perseverance enabled him to create an absolutely personal oeuvre. Consistently striving to reflect the social novelties and transformations that affected architecture, he was often obliged to practise the profession in frankly adverse political and social circumstances.

Candela epitomized the intellectual architect with technical leanings, a well-rounded professional with skills in a number of very different areas. His is exactly the model that I, as Director of the Madrid School of Architecture, advocate in these times of economic and social change, in which architects must adapt to new Europe-wide regulations and conditions. In this model the three essential domains of the profession (architecture, civil engineering and urban planning) remain within the confines of architecture, a discipline that requires at least six years of study to master with the necessary personal and professional maturity. The twentieth century's eminent and versatile professionals, each with a style and personality of their own as exemplified by Candela, charted the course to follow.

I wish to thank Professor Pepa Casinello for her enthusiasm in editing this book and curating this exhibition, in which she had poured her genuine passion for architecture, reminding us of the reasons why we have chosen a profession that bonds us to such inspirational figures as Felix Candela.

Honorable Luis Maldonado Ramos

Director of the Superior Technical School of Architecture of Madrid

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

En 1844, los estudios de arquitectura desarrollados en el seno de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando se separaron de los de pintura y escultura y obtuvieron un grado de autonomía que en adelante sería irreversible. Este hecho marcó la aparición de la Escuela de Arquitectura de Madrid, la cual se estableció en seguida como unos de los centros educativos y culturales más destacados del país.

Durante un buen tercio de siglo, la Escuela de Madrid formó en solitario a todos los arquitectos españoles del momento, y a lo largo del siglo xx ha mantenido un prestigio y un nivel de excelencia que no han flaqueado nunca. El alumno formado en la etsam tiene un perfil característico, pues se le enseña desde el principio a ser exigente, responsable y al mismo tiempo imaginativo, y el cuerpo docente que se encarga de transmitirle los saberes y habilidades pertinentes posee una experiencia y una continuidad, una "tradición" en el mejor sentido de la palabra, que difícilmente el estudiante podrá encontrar en otra escuela, aunque sólo sea por la dilatada historia que ésta tiene a sus espaldas.

Félix Candela es un ejemplo perfecto de arquitecto formado en esta Escuela, innovador, arriesgado, pero técnicamente capaz e imbuido de una idea esencial de tradición y humanismo que deben ser consustanciales a la obra de todo arquitecto. Al mismo tiempo, Candela actúa de referente para las nuevas generaciones de alumnos, pues su talento y perseverancia le llevaron a materializar una obra absolutamente personal, que siempre se hallaba al tanto de las novedades y transformaciones sociales que afectaban a la profesión del arquitecto, y que a menudo se desarrolló en circunstancias políticas y sociales de innegable adversidad.

El modelo que Candela representa, el de un arquitecto intelectual y técnico, un profesional completo con competencias en áreas diversas, es precisamente el que como director de la Escuela de Arquitectura de Madrid defiendo en estos momentos de transformaciones económicas y sociales en los que la figura del arquitecto debe adaptarse a las nuevas normativas y condiciones europeas. Se trata de un modelo en el que los tres ámbitos fundamentales de la profesión (arquitectura, ingeniería civil y urbanismo) se mantienen dentro de los límites de la actividad del arquitecto, un modelo que exige un tiempo mínimo de seis años de estudios que permita al alumno madurar su carácter y aprendizaje. Los grandes profesionales polivalentes y con voz propia del siglo xx, de los que Candela es un ejemplo sobresaliente, indican el camino claro a seguir y del que no debemos apartarnos.

Me gustaría agradecer a la profesora Pepa Casinello su entusiasmo a la hora de ejercer como editora de este libro y comisaria de esta exposición, una labor que ha desempañado con verdadera pasión por la arquitectura, esa pasión que nos recuerda los motivos por los que hemos elegido nuestra profesión, y que nos une a personajes inspiradores como el propio Félix Candela.

Ilmo. Sr. D. Luis Maldonado Ramos
Director de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Pepa Cassinello
Comisaria/*Curator*

José Calavera Ruiz
Asesor/*Advisor*

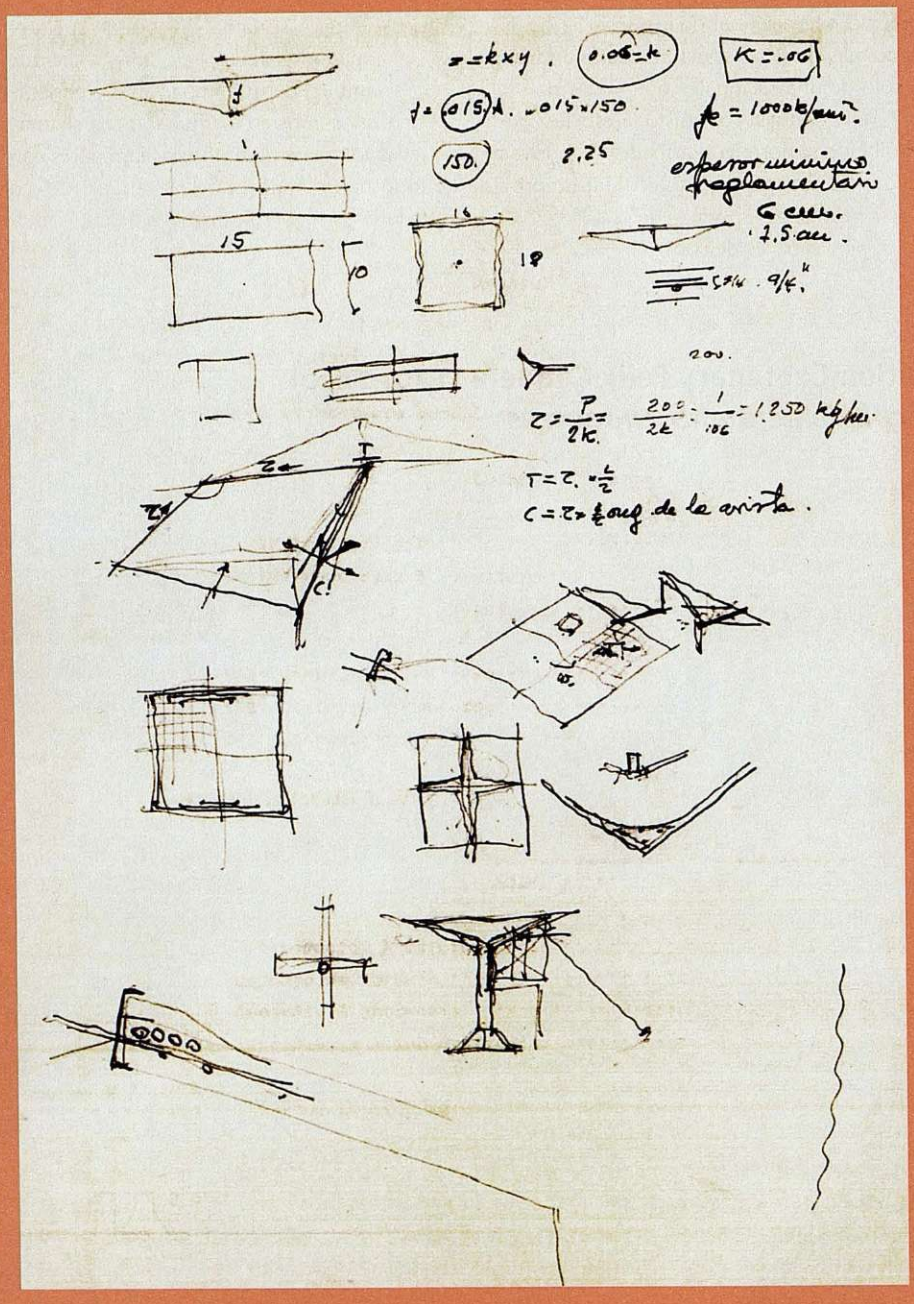
Enrique González Valle
Asesor/*Advisor*

Bernardo Revuelta Pol
Asesor/*Advisor*

José Antonio Torroja
Asesor/*Advisor*

Juan Gerardo Oliva Salinas
Colaborador México/*Collaborator Mexico*

Julia Gómez Candela
Gestora México/*Solicitor Mexico*



Croquis original de Félix Candela
Candela's original sketch
Paraguas/*Umbrellas*
Universidad Islámica de Riyadh
(cesión para la exposición/*dealership to the exhibition*, TYPSA, Pablo Bueno)

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Exposición Centenario Félix Candela (1910-2010)
La conquista de la esbeltez

Pepa Cassinello

En el primer centenario de su nacimiento, y bajo el lema *La conquista de la esbeltez*, se inaugura en Madrid la exposición en homenaje al arquitecto, de origen madrileño, Félix Candela (1910-1997), uno de los más destacados protagonistas de "la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna".

Una aventura que a lo largo de los años se ha convertido en uno de los más venerados hitos de la Historia de la Construcción del siglo XX, no sólo por el extenso y relevante legado patrimonial internacional que forman en su conjunto las llamadas *Thin Concrete Shells* –cascarones de hormigón–, sino porque su aparición fue debida a la voluntad, esfuerzo y valentía de unos cuantos arquitectos, ingenieros y constructores que se unieron como eslabones de una misma cadena, forjada para la búsqueda de la más eficaz, desnuda y esbelta forma laminar resistente. El objetivo era conquistar la nueva libertad de forma y tamaño que el hormigón armado les ofrecía, unida al nuevo sentir de la Modernidad, que en todas las Artes produjo un nuevo e innovador modelo de pensamiento, que será reconocido siempre a través de la posterior y famosa frase atribuida a Mies van der Rohe, *Less is More*.

En el contexto internacional de los años 50-60, Félix Candela adquirió su fama a través de la construcción de más de 800 estructuras laminares de hormigón armado –*Thin Concrete Shells*–, a las que dotó no sólo de una racional y óptima forma resistente sino también de una impactante y escultural belleza. Félix Candela conquistó la esbeltez de la forma en unos años en los que todavía se estaba desarrollando el hormigón armado, cuando generar nuevas formas arquitectónicas laminares con este material era realmente una aventura desprovista de todo tipo de apoyos reglados. Por ello, en cada lugar y momento específico de esta Historia, sus protagonistas se vieron forzados a agudizar su ingenio, para ser capaces de construir nuevas formas laminares.

Exhibition Centenary Felix Candela (1910-2010)
The Achievement of Slenderness

Pepa Cassinello

This exhibition has been organized by the city of Madrid on the occasion of the first centenary of the birth of Felix Candela (1910-1997). With it, his birthplace pays a much deserved tribute to one of the most prominent participants in "Modern Architecture's thin shell adventure."

This adventure has over the years become one of the most highly venerated landmarks of the history of twentieth century construction. It owes this prestige to the extensive and momentous international legacy of thin concrete shells bequeathed to posterity. But just as importantly, its existence is the result of the determination, effort and courage of a few architects, engineers and builders who worked together like links in a chain in pursuit of ever more efficient, bare and slender structural forms. The purpose was to master the new freedom of form and size afforded by reinforced concrete in keeping with the premises of Modernity, which spawned a new and innovative model in all the arts, later condensed into and equated ever since with the famous phrase attributed to Mies van der Rohe, "less is more."

In the international context prevailing in the nineteen fifties and sixties, Candela's renown was based on the construction of over 800 thin concrete shells whose rational and optimal structural form is wholly compatible with striking sculptural beauty. Candela mastered the slenderness of form in an age when reinforced concrete was still evolving, when generating new architectural shells with this material was, indeed, an adventure and as such, devoid of any manner of official support. For that reason, at each specific place and time, its actors were obliged to sharpen their ingenuity to be able to build new shells.

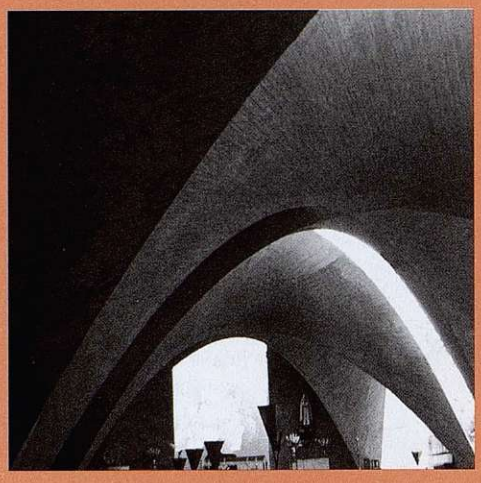
Almost prophetically, Candela was born in Madrid on 27 January 1910, the very year that the "thin shell adventure" began, with the erection of French engineer Simon Boussiron's reinforced concrete roof over Bercy Station in Paris. The future architect's childhood and youth were spent in the very

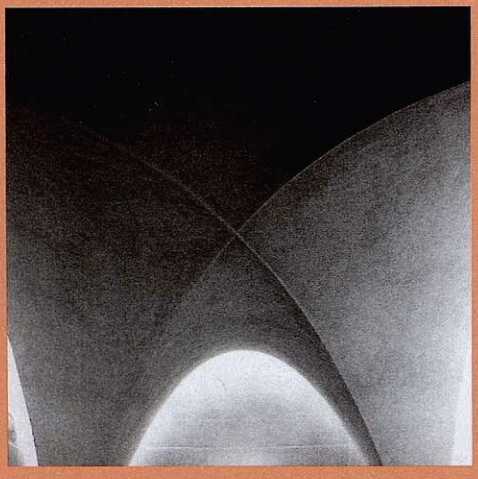
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

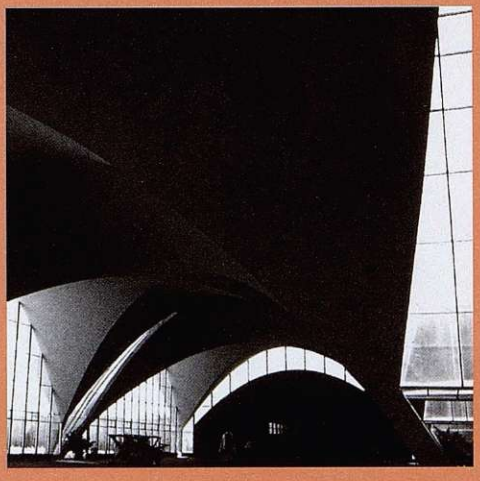












Iglesia/*Church* Medalla de la Milagrosa, Narvarte, México, 1953

Capilla/*Chapel* Lomas Cuernavaca, México, 1957

Restaurante/*Restaurant* Los Manantiales, Xochimilco, México, 1957-1958

Iglesia/*Church* San Antonio de Huertas, Tacuba, México, 1956

Bolsa de Valores/*Stock Exchange*, México D.F., 1953

Embotelladora/*Bottling plant* Bacardí, Cuautitlán, México, 1958

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

A modo de presagio, Félix Candela nació en Madrid el 27 de enero de 1910, el mismo año en el que de alguna manera se inició "la Aventura Laminar" con la construcción de la cubierta de hormigón armado de la Estación de Bercy-París, diseñada por el ingeniero francés Simon Boussiron. Su niñez y juventud transcurrieron ligadas al corazón de Madrid, su ciudad natal, en la que vivió y estudió, y donde su familia tenía una zapatería, Calzados Candela, en el nº 79 de la calle Mayor. Los primeros estudios los realizó en el Centro de Hijos de Madrid, en la Plaza de la Villa, y posteriormente el bachillerato en el Instituto Cardenal Cisneros de la calle San Bernardo. En 1927, inició sus estudios en la Facultad de Ciencias de la Universidad Central, como formación obligatoria previa a su ingreso en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la actual Universidad Politécnica de Madrid, en la cual se licenció como arquitecto en 1935. Desde el inicio de sus estudios en la Escuela, Félix Candela se vio atraído por una singular parte de la más vanguardista arquitectura internacional del momento, interesándose de forma especial por las posibilidades que el hormigón armado ofrecía para generar nuevas formas laminares. Durante sus últimos años de estudiante en la universidad, fue ayudante del profesor Luis Vega, en la asignatura de Resistencia de Materiales, en la que se explicaba fundamentalmente la Teoría de la Elasticidad, siguiendo la clásica tradición francesa. Félix Candela reconoció, años más tarde, esta faceta de su estancia en la universidad de Madrid como una parte muy importante de su formación, por cuanto significó en su posterior especialización autodidáctica sobre las estructuras laminares de hormigón armado.

"¡Cuántas veces no he dado gracias a la enseñanza profundamente teórica que se me impartió en la vieja Escuela de Madrid!"

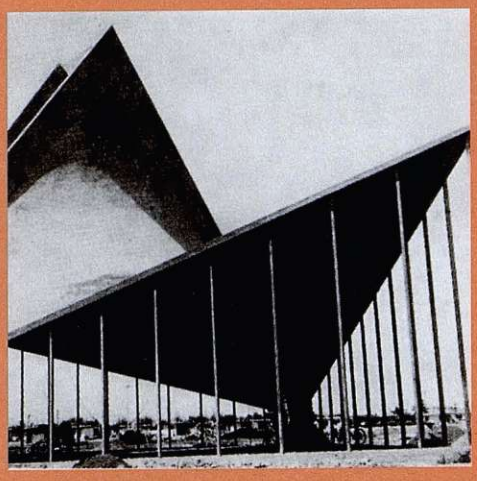
En 1935, el joven arquitecto Félix Candela se sintió especialmente atraído por las innovadoras estructuras laminares construidas en Madrid por el ya consagrado maestro Eduardo Torroja: el Hipódromo de la Zarzuela y el Frontón Recoletos. En 1936, como premio a su tesis doctoral *La influencia de las nuevas tendencias en las técnicas del hormigón armado sobre las formas arquitectónicas*, se le concedió una beca, que había solicitado a la Real Academia de San Fernando, para ampliar sus estudios sobre estructuras laminares en Alemania, país en el que, en 1922, la empresa Dyckerhoff y Widmann había construido la que es considerada como primera *Thin Concrete Shell* del mundo. El inicio de la Guerra Civil española le hizo desistir de su viaje, y se alistó en el Ejercito Republicano. En 1939, una vez finalizada la guerra, Félix Candela se exilió a México. Desde su llegada, se abrió camino desarrollando diferentes trabajos como; delineante, constructor, arquitecto… En 1941 adquirió la nacionalidad mexicana. Recuperada la calma,

heart of Madrid, the city of his birth, where he lived and studied and where his family had a shoe store, Calzados Candela, at 79 calle Mayor (Main Street). He went to the Centro de Hijos de Madrid primary school in the city's Plaza de la Villa (City Square) and earned his baccalaureate at Cardinal Cisneros Institute on San Bernardo Street. In 1927 he enrolled in the Science Faculty of what was then the Central University as a pre-requisite to his admission to the School of Architecture, where he graduated in 1935. From his very first year at the Madrid School of Architecture, Candela was drawn to a specific aspect of the avant-garde architecture of his day. He was keenly interested in the potential he saw in new shell-like forms that could be built with reinforced concrete. In his latter university years, he worked as an aide to professor Luis Vega in his course on Materials and their Properties, essentially lecturing on the Theory of Elasticity in the classic French tradition. Years later, during his honorary doctorate ceremony, Candela also acknowledged the importance of this aspect of his university training in Madrid, in particular for its impact on his later self-apprenticeship in the design and construction of thin reinforced concrete shells.

"Time and again I've thanked my lucky stars for the profoundly academic training I received at my old school in Madrid!"

As a young architect, Felix Candela was captivated by the innovative shells built for Madrid's Zarzuela Racetrack and Recoletos Jai-Alai Court in 1935 by an acknowledged master of the technique, Eduardo Torroja. In 1936, on the grounds of his Ph.D. thesis titled *La influencia de las nuevas tendencias en las técnicas del hormigón armado sobre las formas arquitectónicas* (The effect of new trends in reinforced concrete on architectural forms), he applied for and was awarded a grant by Madrid's Royal Academy of San Fernando. The grant would have allowed him to continue his studies on thin shells in Germany, where Dyckerhoff and Widmann, local builders, had erected what is regarded to be the world's first thin concrete shell in 1922. Those plans miscarried, however, with the outbreak of the Spanish Civil War and his enlistment in the Republican Army. At the end of the war in 1939, Candela sought exile in Mexico. Once there, he worked as a draughtsman, builder, architect… He attained Mexican citizenship in 1941. With his life back on an even keel, Candela recovered his early desire to become directly involved in modern architecture's thin shell adventure. With a good deal of effort and determination, he self-trained to become a builder of thin shells, acquiring each and every one of the skills needed to design, engineer and erect these new forms. Despite his initial degree in architecture, then, Candela is internationally known as an architect, engineer and builder. His self-training enabled

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO








Iglesia/*Church* San José Obrero, Monterrey, México, 1959

Estación metro/*Subway station*, Candelaria, México D.F., 1968

Laboratorio Rayos Cósmicos/*Cosmic Rays Laboratory*, UNAM, México D.F., 1951

Iglesia/*Church* San Antonio de Huertas, Tacuba, México, 1956

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

y con ella su juvenil ilusión por involucrarse directamente en "la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna", Félix Candela, a través de su propio esfuerzo y voluntad, se auto-capacitó para convertirse en constructor de cascarones de hormigón armado, adquiriendo todos y cada uno de los conocimientos necesarios para poder proyectar, calcular y construir nuevas formas laminares. Por ello, con independencia de su primitiva titulación como arquitecto, Félix Candela es reconocido a nivel internacional como arquitecto, ingeniero y constructor. Su auto-capacitación lo hizo libre para construir sus propias ideas, convirtiéndose en uno de los más relevantes protagonistas de esta apasionante historia.

Su etapa creadora más importante se inició en 1950, cuando fundó su propia empresa en México –Cubiertas Ala–, con sus hermanos Antonio (aparejador) y Julia, y con los hermanos arquitectos Fernando y Raúl Fernández Rangel, quienes abandonaron la empresa en 1953. Cubiertas Ala nació con la finalidad de construir cascarones de hormigón armado como cubierta de edificios industriales, pero dado su rápido éxito, se construyeron cubiertas laminares de hormigón para todo tipo de edificios: viviendas, iglesias, restaurantes, club nocturnos, gasolineras... Félix Candela dirigió Cubiertas Ala desde su fundación en 1950 hasta 1969, momento en el cual se hizo cargo su hermano Antonio, quien la dirigió hasta su cierre en 1976. En total se realizaron más de 1.400 proyectos de los que se construyeron un total de casi 900. En este periodo, Félix Candela se convirtió en el más prolífero proyectista y constructor de cubiertas laminares de hormigón armado del mundo. Aunque en un principio experimentó con diferentes formas geométricas resistentes, la mayor parte de su obra la realizó en base al paraboloide hiperbólico, geometría que le permitió crear cascarones muy diferentes, que eran resistentes por su propia forma de doble curvatura y además contaban con la ventaja de poder optimizar su coste de ejecución, ya que se trataba de una superficie reglada, susceptible de ser ejecutada con sencillos encofrados de tablas de madera. Entre las obras más representativas, e internacionalmente conocidas, que Félix Candela realizó con su empresa Cubiertas Ala destacan: el Laboratorio de Rayos Cósmicos en la Universidad Nacional Autónoma de México (1951-1952), la Iglesia de la Medalla Milagrosa (1953), la Fábrica High Life de Coyoacán (1954-55), la Bolsa de Valores de la Ciudad de México (1955), la Capilla de San Antonio de las Huertas en Tacaba (1956), el Club Nocturno La Jacaranda en Acapulco (1957), el restaurante Los Manantiales en Xochimilco (1958), la Capilla Abierta de Palmira en Cuernavaca (1958), la Iglesia de San José Obrero en Monterrey (1959),

him to build his own designs and, in the process, become one of the most prominent players in this exciting adventure.

His most creative years began in 1950, when he founded his own company, Cubiertas Ala, with his brother Antonio (a quantities surveyor) and sister Julia, and architects Fernando and Raúl Fernández, who sold out in 1953. Cubiertas Ala was founded to build roof industrial buildings with thin concrete shells, but in light of their early popularity, it soon began to build shells for all manner of buildings: housing, churches, restaurants, night clubs, petrol stations... Felix Candela presided Cubiertas Ala from its creation in 1950 until 1969, surrendering the reins to his brother Antonio, who ran the company until it closed in 1976. They authored over 1 400 designs, nearly 900 of which were built. In those 19 years, Candela became the most prolific thin concrete shell designer and builder in the world. While at first he experimented with different geometries for his structural forms, most of his oeuvre was based on hyerbolic paraboloids, a form that enabled him to generate a wide variety of shells whose strength derived from their double curvature geometry. Another considerable advantage of these figures was that they optimized construction costs, for as ruled surfaces, they could be built using simple wooden formwork. Some of the most representative and internationally renowned works built by Candela's Cubiertas Ala company include: the National Autonomous University of Mexico's Cosmic Rays Laboratory (1951-1952); Medalla Milagrosa Church (1953); High Life Factory at Coyoacán (1954-55); the Mexico City Stock Exchange (1955); San Antonio de las Huertas Chapel at Tacaba (1956); La Jacaranda night club at Acapulco (1957); Los Manantiales restaurant at Xochimilco (1958); Palmira Open Chapel at Cuernavaca (1958); San Jose Obrero Church at Monterrey (1959); San Vicente de Paul Chapel at Coyoacan (1959); Bacardi Factory at Cuautitlan Izcalli (1960); and the Olympic Games Sports Stadium at Mexico City (1968).

It took Candela very little time to attain international renown. In 1951, just one year after chartering Cubiertas Ala, he built a small thin concrete shell that draw admiration from the world of engineering in general. For the Cosmic Rays Pavilion at the National Autonomous University of Mexico, where he used hyerbolic paraboloid (hypar) geometry for the first time, he designed a shell of subtle beauty and such extreme slenderness (1,5cm at the crown) that it is perceived by the viewer as a fine cloth neatly draped over the building it roofs.

"Now I realize that it was around that time that I began to feel sure of myself, and even venture an opinion of my own."

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

la Capilla de San Vicente Paúl en Coyoacán (1959), la Fábrica Bacardí en Cuautitlán Izcalli (1960) y el Palacio de los Deportes de los Juegos Olímpicos de México (1968).

"Ahora me doy cuenta de que por este tiempo empecé a sentirme seguro de mí mismo, y hasta a atreverme a tener opinión propia".

Pero Félix Candela no tuvo que esperar mucho tiempo para alcanzar la fama internacional. En 1951, tan solo un año después de haber fundado su empresa Cubiertas Ala, Félix Candela construyó un pequeño cascarón de hormigón armado que le hizo merecedor de la admiración del mundo técnico. Se trataba del Laboratorio de Rayos Cósmicos en la Universidad Nacional Autónoma de México, en el que utilizando por primera vez la forma geométrica del paraboloide hiperbólico, proyectó un cascarón de sutil belleza, cuya extrema delgadez (1,5cm en su clave), le hace aparecer ante el espectador, con una fina tela depositada sobre el espacio que cobija.

Hoy, cuando se cumple el centenario de su nacimiento, Madrid, su ciudad natal, le rinde homenaje a través de la exposición *Félix Candela: La conquista de la esbeltez* en un intento de difundir no sólo el conocimiento de los aspectos más relevantes de su vida y obra, sino fundamentalmente el mensaje de su ejemplarizante modelo de pensamiento y actuación, basado en el ejercicio continuo de la voluntad y el esfuerzo personal por conquistar la libertad a través del conocimiento. Félix Candela convirtió los cascarones de hormigón armado en verdaderas esculturas habitables. No en vano, Ove Arup, Frei Otto y David P. Billington han definido su obra como un Arte Estructural.

De la exposición. Gestación y recorrido

La exposición nació con una clara vocación internacional, basada en el entendimiento de la vigencia, alcance y pluralidad del legado de Félix Candela, que no se limita a un enorme e innovador conjunto de más de 800 cascarones de hormigón armado, el mayor jamás creado por un solo hombre, sino también a sus escritos y enseñanzas, que siguen formando parte de la educación universitaria de arquitectos e ingenieros en todos los países.

La exposición conmemorativa del Centenario del nacimiento de Félix Candela (1910-1997) muestra una parte representativa de su vida y obra, que ha sido seleccionada y presentada, con el dual objetivo de difundir el conocimiento y la razón de ser de su relevante trabajo como constructor de cascarones de hormigón armado y su ejemplarizante y específico modelo de pensamiento y actuación

On the occasion of the centenary of his birth, his native city has organized an exhibition as a tribute to the man and his oeuvre, titled *Felix Candela: The Achievement of Slendreness*. In addition to raising awareness of the most prominent aspects of his life and work, this initiative aims primarily to convey the message inscribed in the exemplary course he charted: the conquest of freedom through knowledge acquired by personal determination and effort.

Felix Candela turned thin concrete shells into genuine habitable sculptures, which explains why Ove Arup, Frei Otto and David P Billintong all defined his oeuvre as "structural art."

The Exhibition. Concept and Materialization

The exhibition was conceived with international aspirations based on the reach and plurality of Candela's legacy and its relevance to modern architecture. But that relevance is not limited to his vast and innovative series of over 800 thin concrete shells, more than designed by a single person before or since. It also applies to his writings and teachings, which continue to form part of university training for architects and engineers the world over.

The commemorative exhibition of the centenary of Felix Candela's (1910-1997) birth covers a representative part of his life and works. The selection aims to enhance awareness not only of his significant contribution as a builder of thin concrete shells and the raison d'être of his work, but also of the example set by his rigorous thinking and self-training.

The exhibition, organized around a historical itinerary, begins with a brief explanation of the birth of "modern architecture's thin shell adventure," which went hand-in-hand with the development of reinforced concrete. This initiation serves as a backdrop for understanding the international architectural scenario to which Candela contributed. To relate these historical facts to the most salient aspects of this famous Madrilenian architect's biography, the showing contains a selection of some of his most famous works: pictures (sketches, drawings and photos), scale models, structural analyses and brief explanatory texts. Also on display are a number of Candela's original sketches, exhibited here for the first time, courtesy of Jose Antonio Torroja and TYPSA. They were drawn on the occasion of the architect's participation in the design for buildings erected in Madrid. Visitors to the exhibition

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

autodidacta. Por esta razón, la exposición está organizada en base a un recorrido histórico, que se inicia con una breve explicación del nacimiento de "la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna", ligado al desarrollo del hormigón armado, con el fin de facilitar el entendimiento de las aportaciones realizadas por Félix Candela en el contexto internacional. Entrelazando esta historia con las más relevantes connotaciones de la biografía de este célebre arquitecto madrileño, se expone una selección de algunas de sus más famosas obras, a través de imágenes (dibujos, planos y fotografías), maquetas, análisis estructurales y breves textos explicativos. Se exponen también algunos dibujos originales de Félix Candela, que se muestran por primera vez y que pertenecen a algunas de las colaboraciones realizadas por Félix Candela en Madrid. Han sido cedidos para esta exposición por José Antonio Torroja y TYPSA. Asimismo, se proyecta una película, cedida por la Universidad Nacional Autónoma de México, en la que son entrevistados algunos de los colaboradores de Félix Candela.

Aunque la exposición nació con vocación itinerante, su inauguración en el especial marco escenográfico de las históricas Salas de Bóvedas del Centro Cultural Conde Duque del Ayuntamiento de Madrid permite no sólo cobijar bajo bóvedas las abovedadas formas de los cascarones de Félix Candela sino también ordenar y fragmentar el recorrido de la exposición, produciendo una secuencia espacial que resalta y enfatiza los diferentes temas y aspectos que la exposición ha querido destacar: I) Félix Candela en el contexto internacional de "la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna". Biografía y primeras obras en México, II) Últimas obras en México. Colaboraciones y Trabajos en Madrid, III) Félix Candela Profesor. Homenaje Internacional de Universidades.

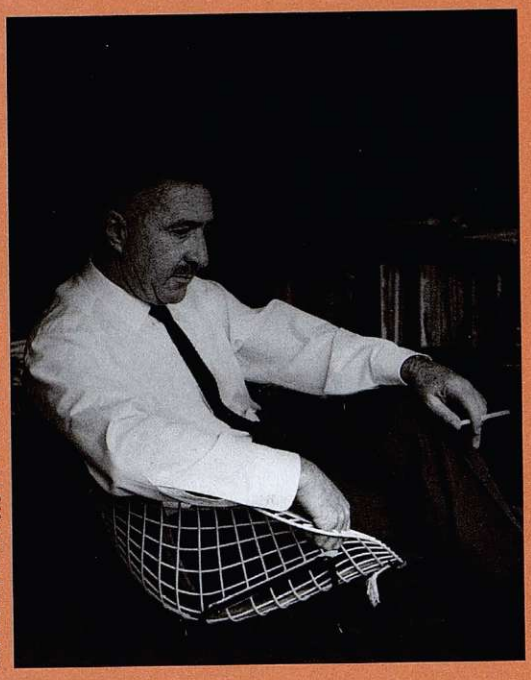
Dado que la forma geométrica que más utilizó Félix Candela para crear sus innovadores cascarones de hormigón armado, fue la del paraboloide hiperbólico, el recorrido de la exposición se inicia con la visión de un gran armazón de madera, de 2,50 metros de altura, ubicado en el hall de acceso, que reproduce esta geometría de forma genérica. Una geometría que estuvo ausente en las arquitecturas del pasado, razón por la cual, tal y como señaló Eduardo Torroja, denota el primer signo de "modernidad" de la obra de Candela: "Es característica fundamental, de todas estas superficies alabeadas, el aparecer cóncavas en una dirección y convexas en la perpendicular, lo que presta una expresión estética totalmente nueva y específica, desconocida de los estilos consagrados".

can also view a series of interviews with some of the people who worked with Candela, filmed by the National Autonomous University of Mexico.

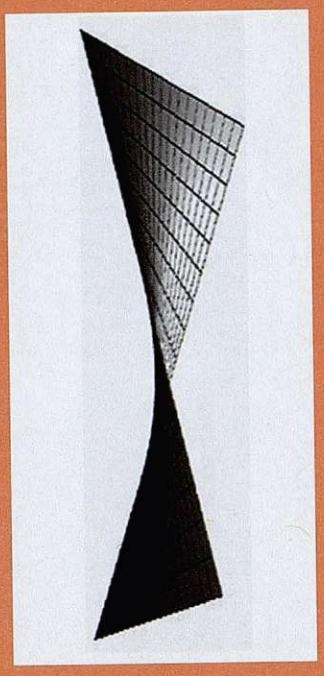
Although the exhibition will later be travelling to other cities, its premiere in the historic Vault Rooms in the City of Madrid's Conde Duque Cultural Centre is highly symbolic for the vaulted shelter afforded Candela's vaulted shells. But in addition, with this venue the displays can be organized into a spatial sequence that highlights the subject areas and aspects that the exhibition aims to stress: I) Félix Candela in the international context of "modern architecture's thin shell adventure." Biography and early works in Mexico. II) Latter works in Mexico. Participation in works in Madrid. III) An international university tribute to Professor Felix Candela.

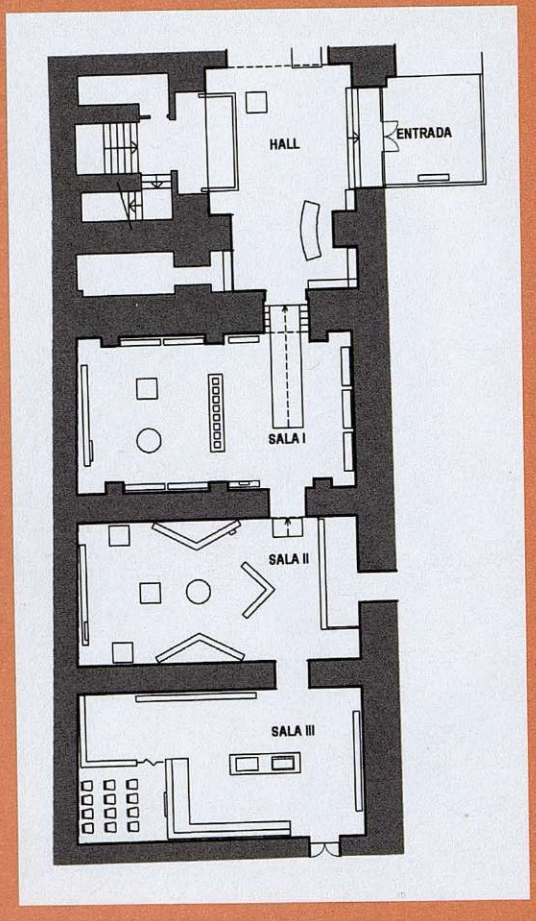
In honour of the geometric form that Candela used most frequently to create his innovative thin reinforced concrete shells, the hyerbolic paraboloid, the first exhibit that greets visitors in the entrance hall is a 2,50-metre high wooden hypar. Inasmuch as this geometry had not been used in previous architecture, its appearance in Candela's works is, as Eduardo Torroja noted, the most prominent sign of modernity in his oeuvre: "The essential characteristic of all these curved surfaces is concavity in one direction and convexity along its perpendicular. This affords them a wholly new and specific aesthetic expression, a clean break from traditional styles."

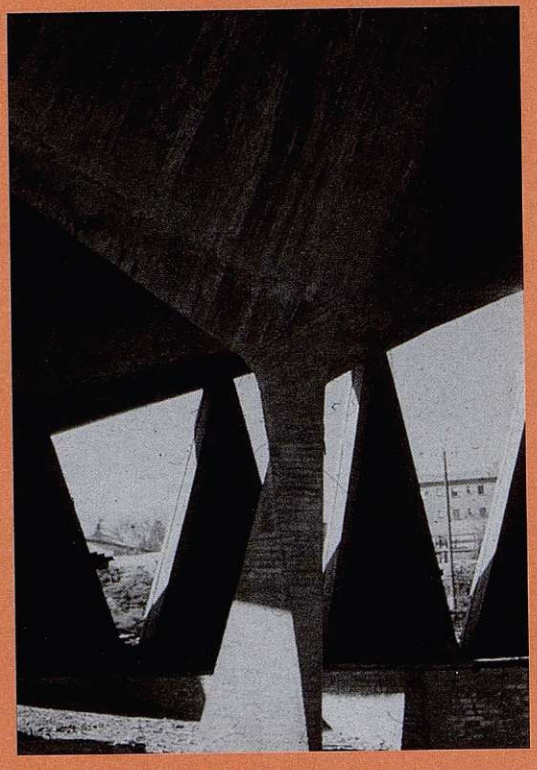
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



Lola Álvarez Bravo © 1995 The University of Arizona Foundation







Félix Candela

Paraboloide Hiperbólico/*Hyerbolic Paraboloid*

Exposición/*Exhibition*, Sala de Bóvedas, Centro Cultural Conde Duque, Madrid, 2010

Iglesia/*Church* Nuestra Sra. de Guadalupe, Madrid, 1962

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

SALA I

Félix Candela en el contexto internacional de "la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna"
Biografía y primeras obras en México

El recorrido de la exposición se inicia entrelazando una breve explicación del significado de "la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna" con los aspectos más relevantes de la vida y primeras obras de Félix Candela. El cruce de estas informaciones tiene como objetivo poner de manifiesto el contexto internacional en el que se produjo la obra de Félix Candela, facilitándose el entendimiento de la razón de ser de sus innovadoras aportaciones, así como el camino que recorrió para alcanzar, en poco tiempo, su gran fama internacional.

Aunque nunca antes ha sido comentado, sin duda es un hecho curioso que el hormigón armado naciera con forma de estructura laminar, y que después de ser utilizado por la Arquitectura y la Ingeniería en muy diferentes tipos de elementos, tras más de 70 años de vida, de alguna manera volviera a su forma original. En efecto, pese a su escasa esbeltez y tamaño, uno de los primeros precedentes construidos en hormigón armado que se conocen son las pequeñas macetas para rosales que construyó el jardinero francés Joseph Monier en 1849, utilizando cemento armado, así como la barca proyectada por Joseph-Louis Lambot en 1848, que fue construida en 1855.

Sin embargo aunque las estructuras laminares de hormigón armado son las formas más idóneas para ser construidas con este material, tal y como dijo muy posteriormente Félix Candela, hasta el año 1922 no fue construida en Jena (Alemania) la que es reconocida mundialmente como primera *Thin Concrete Shell*. Con ella se inició la aventura tecnológica de cambiar de escala aquellas pequeñas macetas laminares de Monier, que, adoptando muy diferentes formas geométricas y tamaños, se convirtieron en uno de los más venerados hitos de la Arquitectura Moderna. Un cambio de escala que, como todos los ocurridos en la Historia, produjo un sinfín de problemas, poniendo de manifiesto, una vez más, la no siempre conocida e inquietante "debilidad de los gigantes".

En esta aventura fueron apareciendo en escena, secuencialmente, relevantes protagonistas que aportaron innovadoras estructuras laminares. Entre ellos destacan, por muy diferentes razones: Robert Maillart (1872-1940), Simon Boussiron (1873-1958), Auguste Perret (1874-1954), Eugène Freyssinet (1879-1962),

ROOM I

Felix Candela in the International Context of "Modern Architecture's Thin Shell Adventure"
Biography and Early Works in Mexico

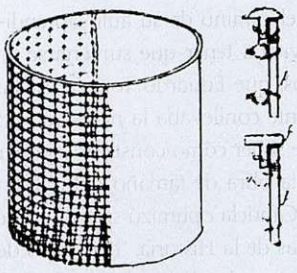
The exhibition itinerary begins with a brief explanation of modern architecture's thin shell adventure, intertwined with the most significant aspects of Candela's life and early works. The objective is to set the architect's initiatives in the international context prevailing at the time, furthering an understanding of the raison d'être of his innovations and the course he followed to attain international renown in a very short time.

That the first reinforced concrete structures were actually thin shells is a fact seldom mentioned. Over 70 years later, after it had been developed for use in many different architectural and engineering elements, the material curiously came full circle, returning in a way to its initial form. More specifically, among the first reinforced concrete structures known to have existed, albeit not exactly slender and anything but large, were French gardener Joseph Monier's reinforced cement flower pots, built in 1849, and a boat designed by Joseph-Louis Lambot the year before and built in 1855.

Nonetheless, even though thin reinforced concrete shells are the optimal forms for this material (as Candela would later say), the first internationally acknowledged shell was not built until 1922 in Jena, Germany. That structure initiated the technological adventure of changing the small scale of Monier's flower pots into any number of geometric forms and sizes that would ultimately become one of the most highly venerated landmarks of modern architecture. Such a change of scale, like so many others in history, entailed countless problems, revealing the generally undisclosed and troubling "weakness of genius."

This adventure lured many actors to the scene, all of whom innovated solutions for thin shells. The most prominent contributions of one type or another were made by: Robert Maillart (1872-1940), Simon Boussiron (1873-1958), Auguste Perret (1874-1954), Eugene Freyssinet (1879-1962), Franz Dischinger (1887-1953), Ove Nyquist Arup (1895-1988), Pier Luigi Nervi (1891-1979), Ulrich Finsterwalder (1897-1988), Eduardo Torroja (1899-1961), Nicolas Esquillan (1902-1989), Anton Tedesco (1903-1994), Oscar Niemeyer (1907), Mario Salvadori (1907-1997), Felix Candela (1910-1997), Matthew Nowitzki (1910-1950),

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



Maceta para rosales/*Flowerpot*
Joseph Monier, 1849



Barca de hormigón/*Concrete boat*
Josehp Lambot, 1855

Franz Dischinger (1887-1953), Ove Nyquist Arup (1895-1988), Pier Luigi Nervi (1891-1979), Ulrich Finsterwalder (1897-1988), Eduardo Torroja (1899-1961), Nicolas Esquillan (1902-1989), Anton Tedesco (1903-1994), Oscar Niemeyer (1907), Mario Salvadori (1907-1997), Félix Candela (1910-1997), Matthew Nowitzki (1910-1950), Eero Saarinen (1910-1961), Bernard Louis Zehrfuss (1911-1996), André Paduart (1914-1985), Heinz Hossdorf (1925-2006), Heinz Isler (1926-2009), Ulrich Müther (1934-2007), Jörg Schlaich (1934).

En 1936 Félix Candela, una vez obtenida la beca solicitada, preparó su viaje a Alemania, pero el inicio de la Guerra Civil española le hizo desistir y decidió permanecer en España luchando en el Ejército Republicano. En 1939, una vez finalizada la guerra, Félix Candela se exilió a México. Avatares de la vida que parecían haber truncado las posibilidades de Félix Candela para convertirse en especialista de la construcción de cascarones de hormigón armado. Sin embargo, tal y como él mismo explicó posteriormente, fue todo lo contrario. Estas específicas circunstancias le facilitaron, en gran medida, el hecho de poder convertir su sueño en realidad. El destino y su sólida formación, unidos a su desmedida ilusión, voluntad y esfuerzo personal, lo convirtieron en pocos años en uno de los más relevantes y prolíferos constructores de cascarones de hormigón armado. En efecto, el destino le llevó a México, un país que reunía las más propicias características para poder construir, de forma económica, una enorme cantidad de estructuras laminares, dado el bajo salario de los obreros en aquellos momentos, así como su benigna climatología. Sin que esto signifique, tal y como dijo Ove Arup, que por ello el enorme patrimonio legado por Félix Candela, a través de sus más de 800 cascarones de hormigón armado construidos en México, no sea debido a la singular capacidad creadora de su autor.

En 1949, Félix Candela, imitando a los "innovadores" maestros de la Historia de la Arquitectura, se había ya convencido, de forma clara y rotunda, de que el camino más adecuado para capacitarse en el diseño y construcción de cascarones de hormigón armado, era la experimentación directa mediante la construcción de modelos, basándose en el conocimiento de las inmutables Leyes de la Naturaleza (Estática, Mecánica y Resistencia de Materiales). Consideró, además, que lo más sencillo e inmediato para él -tenía prisa por aprender- era construir modelos a escala natural, tal y como hicieron los maestros de obras medievales, que, siguiendo este mismo camino de aprendizaje, se capacitaron para crear las catedrales góticas, dotándolas de las más innovadoras bóvedas pétreas. Félix Candela, desde



Planetario de la Universidad
Dyckerhoff y Widmann, 1922-1923
Jena, Alemania

Eero Saarinen (1910-1961), Bernard Louis Zehrfuss (1911-1996), Andre Paduart (1914-1985), Heinz Hossdorf (1925-2006), Heinz Isler (1926-2009), Ulrich Müther (1934-2007), Jörg Schlaich (1934).

After Candela was awarded a grant to study abroad, he prepared his trip to Germany. But with the onset of the Spanish Civil War he postponed his journey and enlisted in the Republican Army. At the war's end in 1939, he sought exile in Mexico. Life's ups and downs, then, would initially seem to have thwarted Candela's chances of every becoming a specialist in thin concrete shell building. And yet, as he himself explained later, these circumstance actually had the opposite effect, largely enabling him to make his dream come true. Destiny and his sound training, combined with his inordinate enthusiasm, determination and personal effort, turned him in a few years' time into one of the world's most renowned and prolific builders of thin shells. Indeed, destiny carried him to Mexico, a country where a huge number of shells could be built economically, given the combination of workers' low salaries (at the time) and a temperate climate. Nonetheless, to paraphrase Ove Arup, regardless of those favourable circumstances, Candela's vast legacy of over 800 thin concrete shells in Mexico would never have existed without the author's singular creativity.

By 1949, Candela, like the "innovative" masters of the history of architecture, was of the clear conviction that the most appropriate way to learn how to design and build thin shells was by experimenting directly with models, based on a knowledge of the unalterable laws of nature (statics, mechanics and material strength). He also felt that the simplest and most immediate path for someone who was in a hurry to learn was to build full-scale models. He drew for his inspiration on the Medieval master builders who had used that method to learn how to build Gothic cathedrals and roof them with innovative stone vaults. With the audacity that stems from mature knowledge, Candela charted a course for his own self-apprenticeship. Moreover, experimenting with full-scale models saved him from having to address another complex field of knowledge: the use of scale models. Masterfully developed by Eduardo Torroja in the nineteen thirties, this method logically entailed the need not only for suitable resources and technology, but also for expertise in building and loading the models and the ability to translate the findings to full-size works. In short, by experimenting with full-scale models, Candela optimized the time invested in his self-training and side-stepped what has arguably been one of architecture's most complex problems throughout history, the change of scale. Failure to heed the

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



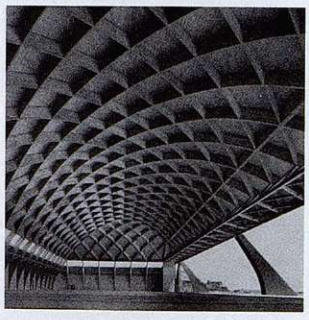
Mercado/*Marquet*
Eugène Freyssinet, 1928-1929
Reims, Francia

la audacia de la madurez de su conocimiento, trazó de esta manera el camino de su auto-aprendizaje. Además, la experimentación con modelos a escala natural le evitaba tener que sumergirse en otro complejo campo del conocimiento: el uso de modelos reducidos, que Eduardo Torroja estaba desarrollando, magistralmente, desde los años treinta, y que lógicamente conllevaba la necesidad no sólo de contar con los medios y tecnología adecuados sino también de saber cómo construir y poner en carga el modelo para poder trasladar los resultados obtenidos a la obra de tamaño natural. En definitiva, con la experimentación de modelos a tamaño natural Félix Candela optimizó su tiempo de auto-aprendizaje, y evitó inmiscuirse en uno de los mayores problemas de la Historia, "el cambio de escala", cuyo olvido a lo largo de esta "Aventura Laminar" ya había generado el colapso de algunas *Thin Concrete Shells* antes de que Félix Candela apareciera en escena. Siguiendo este camino experimental, Félix Candela construyó en 1949, con su hermano Antonio, su primer cascarón experimental. Fue la llamada Bóveda Ctesiphon de San Bartolo de Naucalpan en México. Posteriormente construyó otros cascarones experimentales, como el conoide en la Fábrica de Fernández en San Bartolo en México (1950) y el prototipo de "paraguas" experimental en Las Aduanas, México (1953).



Hipódromo/*Hippodrome*
Eduardo Torroja, 1935
Madrid, España

Las aportaciones más importantes que Félix Candela realizó en el contexto internacional de "la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna" pueden ser entendidas desde el conocimiento de los objetivos de esta Historia, en la que sólo algunos fueron capaces de fundir, en un solo gesto, Arte y Tecnología, proyectando formas racionales, de óptimo funcionamiento estructural, fáciles de construir, e innovadora e impactante belleza. En primer lugar, la relevancia de la obra de Félix Candela se debe a que se autocapacitó para poder actuar a la vez como arquitecto, ingeniero y constructor, no necesitando el apoyo de ningún otro profesional para poder construir sus propias ideas. En definitiva, se convirtió en un "maestro de obras", que a la manera medieval, reunía en una misma persona todos los conocimientos necesarios para crear en libertad. Por esta razón, Félix Candela pudo encontrar la forma geométrica más adecuada para poder optimizar no sólo la belleza escénica de sus cascarones sino a la vez, y de manera inseparable, su funcionamiento estructural, proceso de construcción y coste. Utilizó por ello de forma preferente, formas geométricas de doble curvatura que son resistentes por su propia forma, y de entre todas las posibles, habitualmente el paraboloide hiperbólico, por ser una superficie reglada que permite ser hormigonada sobre un encofrado realizado a base de tablas de madera que siguen sus genera-



Hangares/*Hangars*
Pier Luigi Nervi, 1935
Orvieto, Italia

importance of that issue had led to the collapse of several thin concrete shells before Candela appeared on the scene. Following this self-charted course, Candela and his brother Antonio built their first experimental shell in 1949, the "Ctesiphon Vault," at San Bartolo de Naucalpan, Mexico. They later built other experimental shells such as the conoid for the Fernandez Factory at San Bartolo (1950) and the "umbrella" prototype at Las Aduanas (1953), both in Mexico.

In the international context, Candela's most important contributions to "modern architecture's thin shell adventure" can be viewed from an understanding of the objectives of that adventure. Very few of the professionals involved were able to merge art and technology in a single endeavour, designing rational forms that combined optimal structural strength and ease of construction with innovative and striking beauty. The significance of Candela's oeuvre is due, firstly, to the self-training that enabled him to practise as architect, engineer and builder at one and the same time, with no need to depend on the expertise of other professionals to build what he himself designed. Ultimately, he became a "master builder" in the Medieval sense, a single person in possession of all the knowledge needed to be free to create. For that reason, Candela was able to find the most suitable geometry to optimize not only the compositional beauty of his shells, but at the same time and inseparably, their structural efficiency, construction and cost. In this regard, he preferred geometric forms with a double curvature that in itself is a source of strength. Of all the possible such forms, he usually chose hyerbolic paraboloids, for thanks to their ruled surface the resulting structures could be cast over formwork made of straight wooden planks. He limited size to shape, never exceeding spans of 30m between supports, and optimized slenderness. By reducing the thickness of these shells to a minimum, he was also able to build them without stiffening ribs. The end result was a structure with a constant thickness throughout and a bare, striking beauty, true to the geometric purity of the form. ("Less is More".) In Candela's hands, the hyerbolic paraboloid developed a spatial language of its own, generating a wide variety of intersecting geometries, fruit of his educated creative intuition. One of his most characteristic structures was the so-called "umbrella," a shell formed by the spatial intersection of four hyperbolic paraboloid (hypar) spandrels resting on a single central column.



Exposición Nacional/*Nacional Exhibition*
Robert Maillart, 1939
Zúrich, Suiza

A list of the works on display in this room and the rest of the exhibition is given in Annex 2. They include: the Cosmic Ray Pavilion at the National Autonomous University of Mexico (1951); a

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

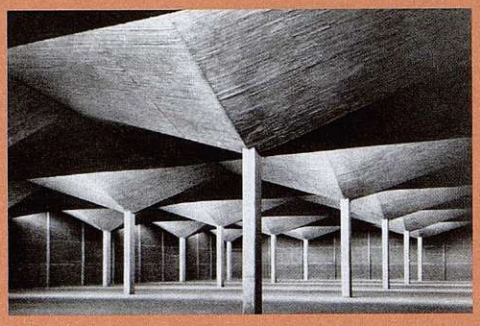


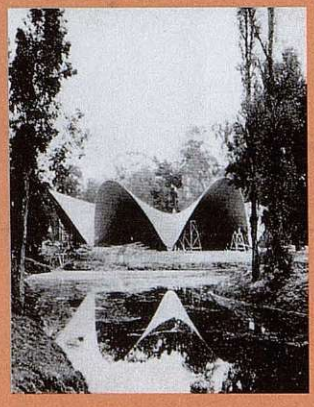


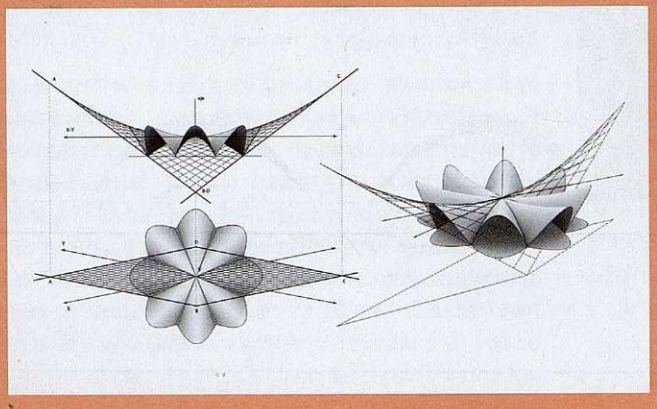












Bóveda experimental/*Experimental vault* Ctesiphon, San Bartolo, México, 1949

Conoide experimental/*Experimental conoidal vault*, Fábrica/*Factory* Fernández, San Bartolo, México, 1950

Paraguas experimental/*Experimental umbrella*, Aduanas, México, 1953

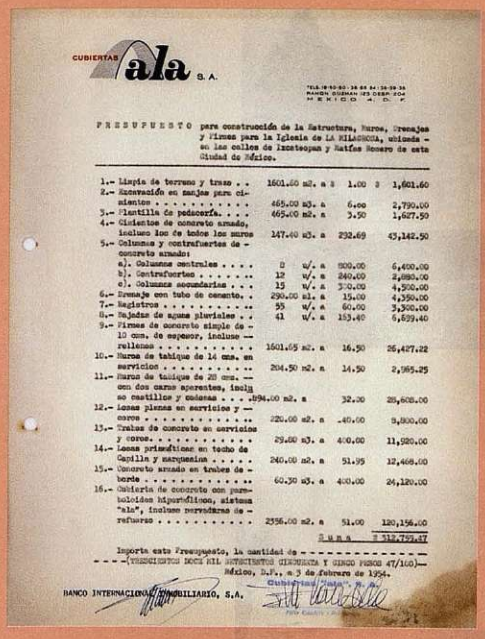
Laboratorio de Rayos Cósmicos/*Cosmic Rays Laboratory*, UNAM, México D.F., 1951

Fábrica/*Factory* High Life, Coyoacán, México, 1954-55

Almacén/*Warehouse* Celestino Fernández Vallejo, México, 1955

Restaurante/*Restaurant* Los Manantiales, Xochimilco, México, 1957-1958 (dibujo/*drawing* C. García Reig)

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



CUBIERTAS Ala S. A.

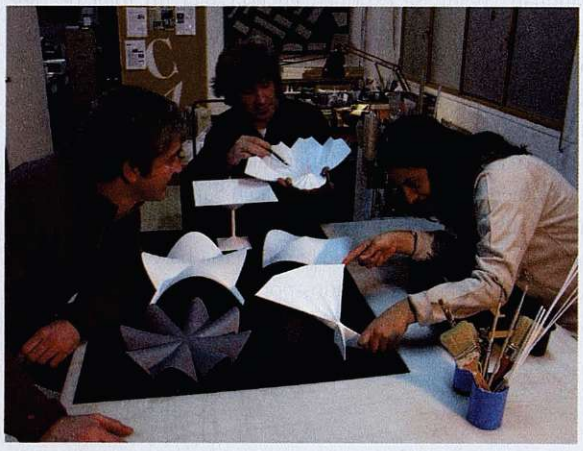
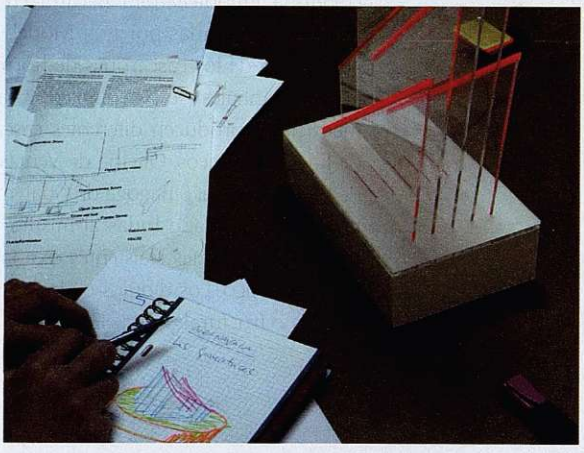
TELS. 18-93-80 - 36-84-44 - 36-38-36
RAMON GUZMAN 123 DESP. 204
M E X I C O 4, D. F.

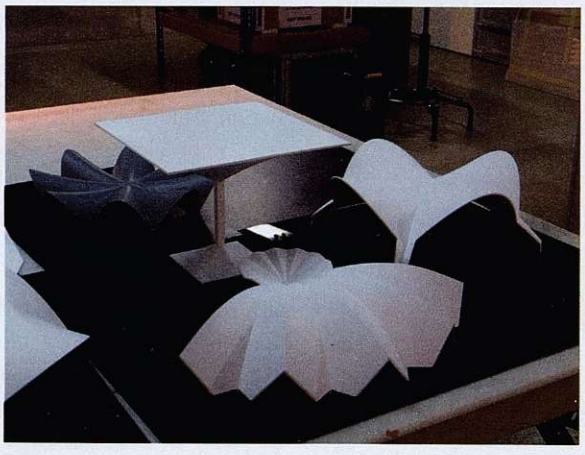
PRESUPUESTO para construcción de la Estructura, Muros, Trabes y Firmes para la Iglesia de LA MILAGROSA, ubicada en las calles de Ixcateopan y Ratfes Romero de esta Ciudad de México.

1.-	Limpia de terreno y trazo . .	1601.60	m2. a	$ 1.00	$ 1,601.60
2.-	Excavación en zanjas para cimientos	465.00	m3. a	6.00	2,790.00
3.-	Plantilla de pedacería. . . .	465.00	m2. a	3.50	1,627.50
4.-	Cimientos de concreto armado, incluso los de todos los muros	147.40	m3. a	292.69	43,142.50
5.-	Columnas y contrafuertes de concreto armado:				
	a). Columnas centrales	8	m/. a	800.00	6,400.00
	b). Contrafuertes	12	m/. a	240.00	2,880.00
	c). Columnas secundarias . . .	15	m/. a	300.00	4,500.00
6.-	Brocal con tubo de cemento. .	290.00	ml. a	15.00	4,350.00
7.-	Registros	55	m/. a	60.00	3,300.00
8.-	Bajadas de aguas pluviales . .	41	m/. a	153.40	6,289.40
9.-	Firmes de concreto simple de 10 cms. de espesor, incluso rellenos	1601.65	m2. a	16.50	26,427.22
10.-	Muros de tabique de 14 cms. en servicios	204.50	m2. a	14.50	2,965.25
11.-	Muros de tabique de 28 cms. con dos caras aparentes, incluso castillos y cadenas . . .	894.00	m2. a	32.00	28,608.00
12.-	Losas planas en servicios y cores	320.00	m2. a	40.00	9,800.00
13.-	Trabes de concreto en servicios y cores.	29.60	m3. a	400.00	11,920.00
14.-	Losas prismáticas en techo de Capilla y marquesina	240.00	m2. a	51.95	12,468.00
15.-	Concreto armado en trabes de berta	60.30	m3. a	400.00	24,120.00
16.-	Cubierta de concreto con paraboloides hiperbólicos, sistema "ala", incluso revestidura de refuerzo	2356.00	m2. a	51.00	120,156.00
				SUMA	$ 318,759.47

Importa este Presupuesto, la cantidad de - - -





Taller de Maquetas/*Model workshop*
Autores/*Authors* HCH Model
Madrid, 2010

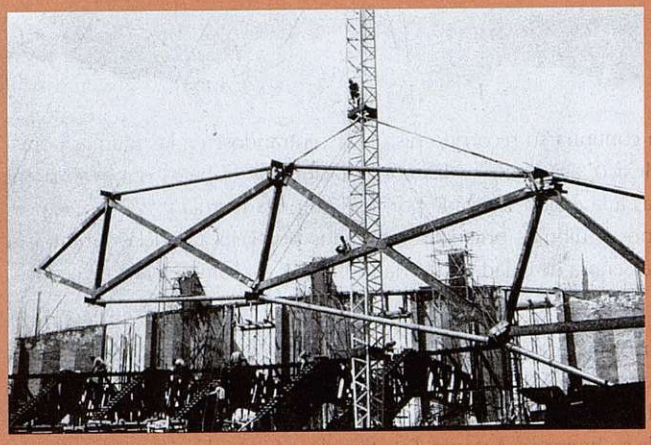
FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

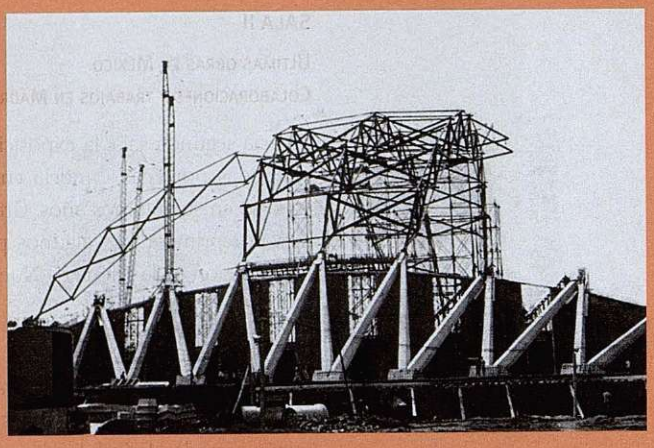
trices rectas. Utilizó tamaños adecuados a la forma, no sobrepasando los 30 metros de luz libre de vano entre apoyos, optimizó su esbeltez dotando a estos cascarones de pequeños espesores de hormigón armado, consiguió también dotarlos de bordes libres de nervaduras de rigidez, aportando uniformidad de espesor al cascarón de hormigón armado, y así una imagen rotunda, desnuda, y fiel a la forma geométrica pura, *Less is More*. En las manos de Félix Candela, el paraboloide hiperbólico cobró un especial lenguaje espacial, generando maclas geométricas muy diferentes, producto de su educada intuición creadora. Uno de los elementos laminares más característicos utilizados por Félix Candela fue el llamado "paraguas", una estructura laminar formada por la macla espacial de cuatro tímpanos de paraboloides hiperbólicos –*hypar*–, sostenidos por un solo pilar central.

El listado de obras expuestas en esta sala, así como en el resto de la exposición, están recogidas en el anexo 2 . Entre ellas destacan: el Pabellón de Rayos Cósmicos de la Universidad Nacional Autónoma de México (1951), el conjunto seleccionado de obras en las que Félix Candela utilizó "paraguas", como la Fábrica High Life de Coyoacán (1954-55), la Capilla de San Antonio de las Huertas en Tacaba (1956), el Restaurante Los Manantiales en Xochimilco (1958), la Capilla abierta de Palmira en Cuernavaca (1958), la Embotelladora Bacardí en Cuautitlán (1958). Se exponen en esta sala un total de diez maquetas realizadas por HCH Model. Dos de ellas reproducen, a través de sus generatrices, la forma geométrica de los cascarones de hormigón armado de dos de sus más famosas obras, el Restaurante Los Manantiales de Xochimilco y la Capilla abierta de Cuernavaca (escala 1/50). Las otras ocho maquetas reproducen diferentes cascarones creados por Félix Candela; paraguas genérico, Pabellón de Rayos Cósmicos, Oficina de Ventas de Jalisco, Restaurante Los Manantiales, Club Jacaranda, Iglesia de Santa Mónica, Sinagoga de Guatemala y Cubierta para banda de música en Santa Fe. Estas maquetas se han realizado todas al mismo tamaño (30x30cm), porque su finalidad es mostrar un variado conjunto de formas resistentes creadas por Félix Candela a partir de la geometría base del paraboloide hiperbólico. Los dibujos de las diferentes obras han sido realizados por Carmen García Reig, y los análisis estructurales por el Método de Elementos Finitos por José María Goicolea.

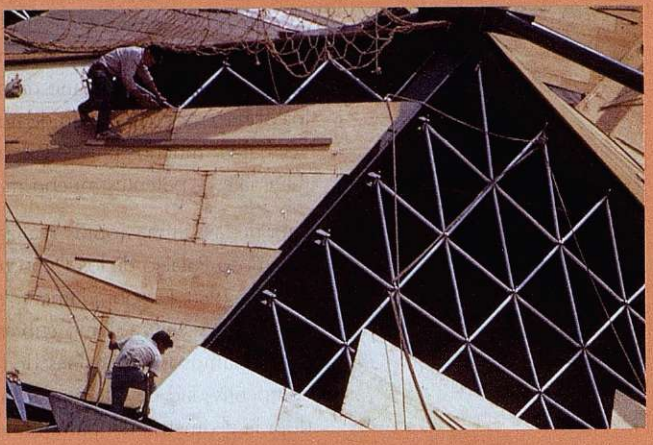
selection of works in which Candela used "umbrellas," such as the High Life factory at Coyoacan (1954-55); San Antonio de las Huertas Chapel at Tacaba (1956); Los Manantiales restaurant at Xochimilco (1958); Palmira Open Chapel at Cuernavaca (1958); and the Bacardi bottling plant, Mexico City (1958). A total of 10 scale models are exhibited in this room, all authored by HCH Model. Two reproduce the geometry of the reinforced concrete shells on two of his most famous works, Los Manantiales restaurant at Xochimilco and the open chapel at Cuernavaca (scale 1/50). The remaining eight models represent other shells: generic umbrella, Cosmic Ray Pavilion, Jalisco sales office, Los Manantiales restaurant, Jacaranda night club, Santa Mónica Church, synagogue at Guatemala and the musical roof at Santa Fe. All these models, which were built to the same size (30x30cm), aim to show the variety of structural forms created by Candela from a single base geometry: the hyerbolic paraboloid. The drawings were authored by Carmen Garcia Reig, and the structural analysis MFE by Jose Maria Goicolea.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO













Proceso de construcción/*Construction process*
Palacio de Deportes/*Sport Stadium*
México, 1968

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

SALA II

Últimas obras en México
Colaboraciones y trabajos en Madrid

En esta segunda sala, la exposición continúa su recorrido histórico, centrándose en las últimas obras realizadas por Félix Candela en México, así como en las colaboraciones y trabajos que realizó en Madrid en sus últimos años. Gracias a la cesión realizada por José Antonio Torroja y TYPSA, se exponen por primera vez, algunos planos y dibujos originales realizados por Félix Candela durante su intervención en la Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe (Madrid, 1963), así como en la Universidad Islámica de Riyadh.

El año 1969 tuvo un significado muy especial no sólo en la vida y trabajo de Félix Candela sino también en el destino de "la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna". Este mismo año Félix Candela abandonó su empresa Cubiertas Ala, con la que había ya construido más de 800 cascarones de hormigón armado, dejándola a cargo de su hermano Antonio. Este tipo de cubiertas laminares dejaron de ser tan novedosas, y sobre todo, tan rentables como años atrás. Desde casi el inicio de la década de los años sesenta, las condiciones en México, como en la mayor parte del mundo, habían cambiado. Por una parte, la mano de obra se había encarecido con la justa llegada de mejores salarios para los obreros, y la aparición de normas y reglamentaciones limitaron en alguna medida la libertad proyectual en muchos países. Por otra parte, empezaron a aparecer en el mercado internacional nuevos materiales y patentes mucho más competitivos.

Una de las últimas obras realizadas por Félix Candela en México con su empresa Cubiertas Ala fue el famoso Palacio de los Deportes de México, construido para la celebración de los Juegos Olímpicos del año 1968. Es sobradamente significativo el hecho de que Félix Candela utilizara, en este caso, una estructura metálica como cubierta de este representativo espacio de la ciudad de México, y no uno de sus famosos cascarones de hormigón armado. Sin duda, además de su gran tamaño, influyó la competitividad de este otro tipo de armazón estructural, en el que sin embargo, Félix Candela introdujo la geometría del paraboloide hiperbólico en la formación de las diferentes superficies espaciales que dieron forma al plemento de la cubierta.

ROOM II

Latter Works in Mexico
Participation in Works in Madrid

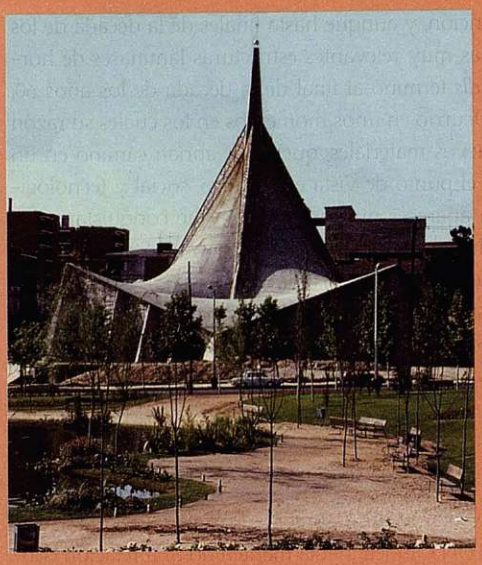
In this second room, the exhibition continues its historical itinerary, focusing on Candela's last few works in Mexico and his contributions to projects in Madrid near the end of his life. Thanks to loans from Jose Antonio Torroja and TYPSA, some of his original sketches and drawings for Our Lady of Guadalupe Church (Madrid, 1963) and the Islamic University at Riyadh are exhibited here for the first time.

The year 1969 was particularly significant, not only in Candela's life and work, but for modern architecture's thin shell adventure as a whole. That was the year that he retired from his company, Cubiertas Ala, with which he had built over 800 thin concrete shells, turning it over to his brother Antonio. This type of roofs had ceased to be as innovative, and especially as cost-effective, as they had been in the past. Conditions in Mexico, as in most of the rest of the world, began to change in the early nineteen sixties. On the one hand, labour became more costly with the onset of higher and fairer salaries, while the appearance of rules and regulations limited the freedom of design in many countries. And on the other, new materials and much more competitive patents began to appear on the international market.

One of the last works designed and built by Candela in Mexico with Cubiertas Ala was the famous Sports Stadium built for the Olympic Games held in Mexico City in 1968. Candela's decision to use a steel structure to roof the stadium that was to represent Mexico City to the world, rather than one of his famous thin concrete shells, is highly significant. In addition to the enormous size of the building, the cost-competitiveness of this type of structural frame must have indisputably influenced his decision. That notwithstanding, he introduced his favourite hyerbolic paraboloid geometry in the spaces forming the roof severy.

It is a fact that the "thin concrete shell adventure" came to an end in the nineteen sixties, fifty years after it began and after it had reached the summit of the freedom provided by this building technique (although a few such structures were still erected through the late nineteen seventies). The adventure

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO









Iglesia/*Church* Nuestra Sra. de Guadalupe, Madrid, 1962-1963

Universidad Islámica/*Islamic University* de Riyadh, TYPSA

Estación de metro/*Subway station* Puerta del Sol, Madrid, TYPSA

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





Félix Candela en el Instituto Eduardo Torroja de Madrid.
22 de octubre de 1969

Es un hecho que, trascurridos 50 años desde su aparición, y aunque hasta finales de la década de los años 70 todavía continuaron construyéndose algunas muy relevantes estructuras laminares de hormigón, "la Aventura Laminar" de las *Thin Concrete Shells* terminó al final de la década de los años 60, una vez conquistada la cima de esa nueva libertad. Ocurrió en unos momentos en los cuales su razón de ser empezaba a extinguirse ante la llegada de nuevos materiales, que ya se abrían camino en un contexto internacional que era muy diferente desde el punto de vista económico, social y tecnológico. Unos momentos en los cuales ya empezaban a aparecer nuevos caminos que conquistar en el campo de las estructuras espaciales. No en vano, la International Association for Shell Structures IASS, fundada por Eduardo Torroja en Madrid en 1959, diez años después, ante la escasa aparición de nuevas *Thin Concrete Shells*, y aprovechando las mismas siglas y logotipo de la asociación, pasó a llamarse, en 1970, International Association for Shell and Spatial Structures, ocupándose desde entonces de un campo más amplio, en el que tienen cabida todas las estructuras espaciales, en cuyo proyecto y construcción pronto se integraron nuevos materiales, que como el vidrio protagonizan hoy las más relevantes construcciones de la vanguardia arquitectónica del siglo XXI. Por ello, diez años después de la fundación en Madrid de la IASS, "la Aventura Laminar" había terminado.

Fue también en 1969 cuando Félix Candela volvió a visitar Madrid, su ciudad natal, desde que se exilió a México treinta años antes. Aunque desde 1955, Félix Candela había mantenido una relación continua desde México con el Instituto dirigido por Eduardo Torroja en Madrid, fue el 22 de octubre de 1969 cuando lo visitó personalmente por primera vez. Félix Candela fue recibido en el Instituto por Fernando Cassinello, su director en aquellos momentos, y a las siete de la tarde pronunció una conferencia sobre su obra. Félix Candela visitó también la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, explicando sus famosos cascarones a los alumnos de la que, años atrás, fuera su propia Escuela de Arquitectura, donde se licenció en 1935.

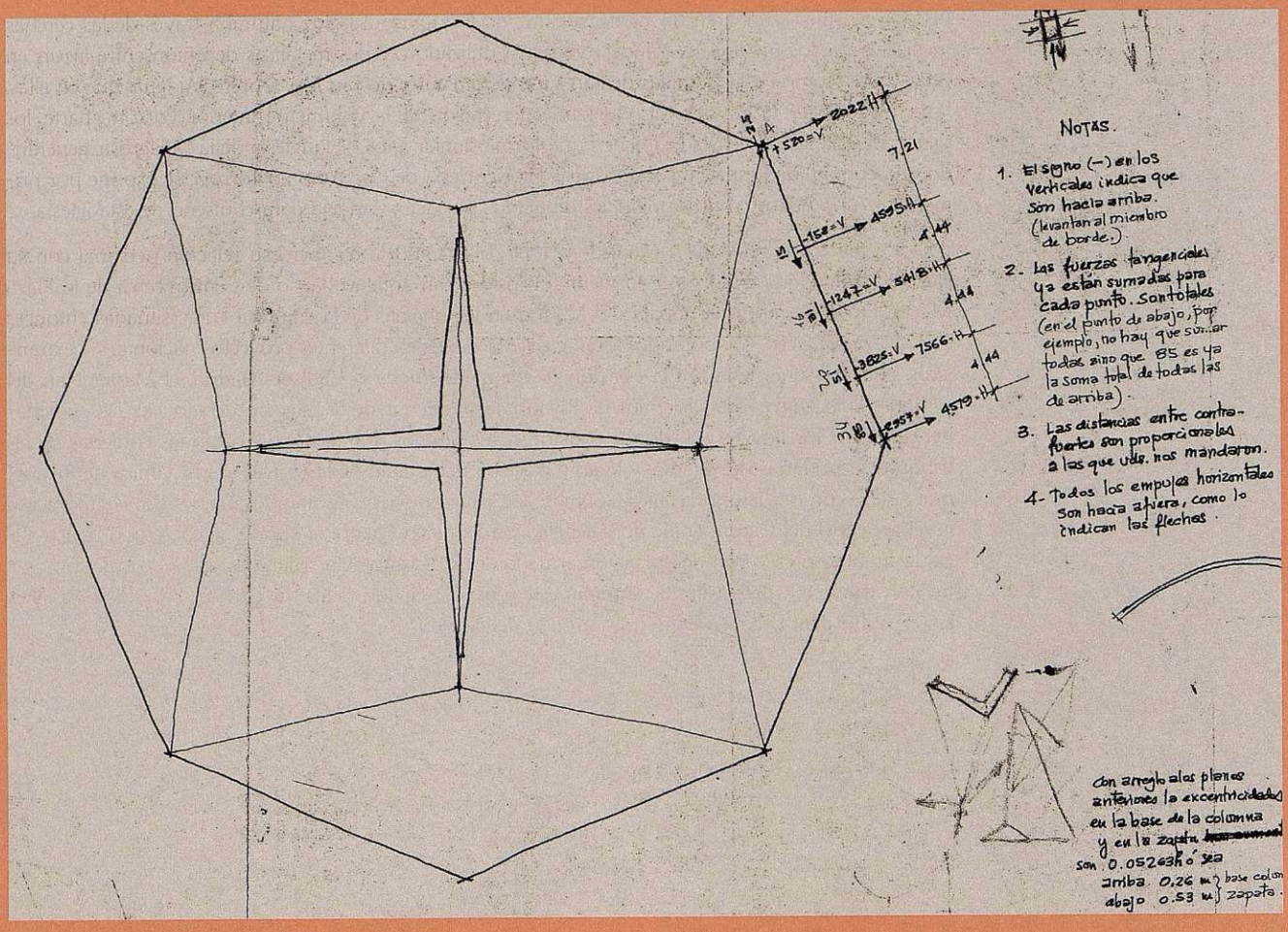
Durante los años 1962 y 1963 Félix Candela fue asesor de la Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe de Madrid, conocida como la iglesia "de los mexicanos". En ella intervinieron como arquitectos el mexicano Enrique de la Mora y el español José Ramón Azpiazu, así como el ingeniero José Antonio Torroja. La iglesia se desarrolla sobre una planta sensiblemente circular de diámetro exterior máximo de 53,74m. Utilizando la geometría básica del paraboloide hiperbólico, la cubierta está formada por

drew to a close as the *raison d'être* of thin concrete shells waned with the advent of new and increasingly popular materials and changing economic, social and technological scenarios the world over. The time had come for spatial structural design to explore new avenues. It was no coincidence that in late 1969, in light of the declining construction of thin concrete shells, the International Association for Shell Structures (IASS) founded by Eduardo Torroja in Madrid in 1959 changed its name (equally well suited to its acronym) to the International Association for Shell and Spatial Structures, effective in 1970. Since that time, the association has covered a much broader field of endeavour, namely spatial structures in general, whose design and construction soon accommodated new materials, such as glass, that now play a leading role in twenty-first century *avant-garde* architecture. Ten years after the IASS was founded in Madrid, then, the thin shell adventure expired.

It was also in 1969 that Candela returned to Madrid, his native city, for the first time since he took up exile in Mexico in 1939. Although he had maintained ongoing relations with the institute headed by Eduardo Torroja in Madrid since 1955, it was not until 22 October 1969 that he visited it personally. Candela was welcomed to the institute by Fernando Cassinello, director at the time, and delivered a lecture on his oeuvre that evening at 7:00. He also visited the Madrid School of Architecture, describing his famous shells to students of a school where he himself had trained until his graduation in 1935.

In 1962 and 1963, Felix Candela participated as technical adviser for Our Lady of Guadalupe Church in Madrid, also known as the "Mexican Church." The design was co-authored by architects Enrique de la Mora and Jose Ramon Azpiazu, respectively Mexican and Spanish, along with engineer Jose Antonio Torroja. The church is built over a perceptibly circular footprint with a maximum diameter of 53,74 m. The roof consists in eight hyerbolic paraboloids that meet at a central vertex and are connected by skylights consisting of glazed steel trusses. Candela had used steel trusses to join thin concrete *hypars* in other works, such as St Vincent de Paul and St Joseph Chapels. As in those buildings, daylight reinforces the sensation of spacious volume in the interior. The shape of the columns in this Madrilenian temple and in Milagrosa Church are similarly shaped and form a continuum with the *hypars*. One of Candela's original sketches for the church design is exhibited here, courtesy of Felix Candela.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



Croquis original de Félix Candela/*Candela's original sketch*
(cesión para la exposición/*dealership to the exhibition*, José Antonio Torroja, 2010)

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

ocho *hypar* que se unen en un vértice central, dejando paso a la luz natural a través de las cerchas metálicas que los unen. Félix Candela ya había utilizado cerchas metálicas de unión entre *hypars* en otras obras, como en las Capillas de San Vicente de Paúl y de San José Obrero. Al igual que en ellas, la penetración de la luz natural refuerza la percepción de la volumetría interior. Por otra parte, los pilares de esta iglesia de Madrid tienen una forma similar a los de la Iglesia de la Milagrosa, generando una continuidad espacial con los *hypars*. Por cortesía de José Antonio Torroja, se expone por primera vez uno de los croquis originales dibujados por Félix Candela para el diseño de esta iglesia.

Por otra parte, tras su visita a Madrid en 1969, Félix Candela recuperó su relación personal con su ciudad natal, adquiriendo posteriormente un piso en su antiguo barrio de Centro, cerca de la Plaza Mayor. En 1981 empezó a trabajar en Madrid en las oficinas de la empresa TYPSA, situadas entonces en la Plaza del Liceo, colaborando durante casi diez años en diferentes proyectos nacionales y extranjeros, entre los que destacan: la estación de metro de Puerta del Sol de Madrid, el Master Plan del campus de la Universidad Islámica de Riyadh, las cubiertas de la estación de servicio, las cubiertas del centro de los Boy Scouts, donde construyó sus últimos "paraguas", así como las cubiertas de las tribunas secundarias del estadio, y la gran cubierta del estadio de la Universidad Islámica de Riyadh, que diseñó con estructura metálica (150m de luz entre apoyos). Su último trabajo fue la colaboración en el proyecto del Oceanogràfic de Valencia, con Santiago Calatrava, donde se construyó una réplica de su famoso cascarón de hormigón armado del Restaurante Los Manantiales de Xochimilco, que fue construido en 1958. Antes de terminar este proyecto, el 7 de diciembre de 1997, Félix Candela falleció en el hospital Duke en Durham (Carolina del Norte).

On the other hand, after his 1969 visit, Candela recovered his personal relationship with the city of his birth, where he later purchased a flat in his old neighbourhood in the centre of the city, near the Plaza Mayor or Main Square. In 1981 he accepted employment with TYPSA, working at the company's former headquarters on Liceo Square. He collaborated with TYPSA for nearly 10 years in a number of projects in Spain and abroad, including: Madrid's "Puerta del Sol" underground station; the Master Plan for Riyadh Islamic University Campus; the roofs over its service station and Boy Scout Centre (his last "umbrellas"), and the roofs over the secondary seating in the university stadium and the huge steel structure roof over the stadium itself (spanning 150m between supports.) His last commission, in conjunction with Santiago Calatrava, was the design for L'Oceanografic at Valencia, which included a replica of his famous thin concrete shell for Los Manantiales restaurant at Xochimilco, built in 1958. Before the building was completed, however, Felix Candela died at Duke Hospital in Durham, North Carolina, USA, on 7 December 1997.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



Félix Candela
Doctor Honoris Causa
Honorary Doctorate
Madrid, 1994

SALA III

Félix Candela profesor
Homenaje Internacional de Universidades

La última sala de la exposición se destina al homenaje internacional de diferentes universidades, nacionales y extranjeras, al legado de Félix Candela, que como ya hemos dicho no se limita a su innovadora, impactante y cabal obra, sino que también está referida a sus escritos y enseñanzas, que actualmente siguen vigentes en las universidades del mundo.

Félix Candela se involucró de forma directa en la formación de nuevas generaciones de arquitectos. Su interés por la educación se inició en sus últimos años de estudiante en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, en la que fue ayudante del profesor Luis Vega en la asignatura de Resistencia de Materiales. Desde 1953, fue profesor de arquitectura en la Universidad Nacional Autónoma de México; posteriormente, en 1971 fue nombrado catedrático en la Universidad de Illinois, Chicago, donde se trasladó a vivir, obteniendo la nacionalidad americana en 1978. En 1992 presidió la Academia Internacional de Arquitectura. En 1994, la Universidad Politécnica de Madrid lo nombró Doctor Honoris Causa. A lo largo de su vida, Félix Candela escribió varios libros y artículos, entre los que cabe destacar dos publicaciones que recogen una clara explicación de su especial entendimiento del mundo de las estructuras arquitectónicas. El primero de ellos se publicó bajo el título *Hacia una nueva filosofía de las estructuras*, en Buenos Aires, en 1962, que es una transcripción de la famosa contribución de Candela al Congreso Mexicano celebrado en 1951. El otro libro se publicó en Madrid en 1985, y es una selección de algunos de sus escritos, realizada por él mismo, publicada bajo el título *En defensa del formalismo y otros escritos*.

Con el claro objetivo de cubrir el amplio espectro de su internacional legado, Madrid, ha querido organizar una exposición que contara con la colaboración de todas las universidades nacionales y extranjeras que quisieran unirse a este homenaje en el cumplimiento del primer centenario de su nacimiento. Con este fin, el pasado mes de septiembre 2009, una vez iniciado el curso universitario, la Universidad Politécnica de Madrid, a través de sus escuelas de Arquitectura e Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, con la colaboración de la Fundación Juanelo Turriano y el Instituto Técnico de

ROOM III

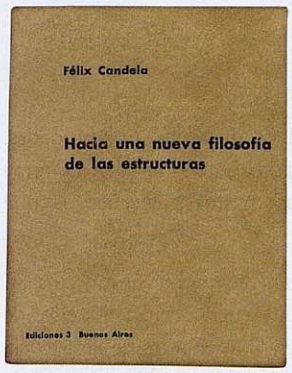
An International University Tribute to Professor Felix Candela

The final room in the exhibition houses an international tribute to Candela's legacy on the part of universities in Spain and abroad. As noted above, that legacy is not limited to his innovative, striking and extensive oeuvre, but also includes his writings and teachings, still in use in universities the world over.

Felix Candela became personally involved in training new generations of architects. His interest in education dated from his latter years as a student at Madrid's School of Architecture, where he aided Professor Luis Vega, teaching part of his course on Materials and their Properties. He was professor of architecture at the National Autonomous University of Mexico from 1953 onward, and in 1971 he accepted a full professorship with the University of Illinois at Chicago, where he relocated and obtained American citizenship in 1978. In 1992 he presided the International Academy of Architecture. In 1994 he was awarded an Honorary Doctorate from the Polytechnic University of Madrid, Spain. During his lifetime, Candela wrote a number of books and articles. Two of these publications contain a clear explanation of his particular approach to architectural structures. The first, titled *Hacia una nueva filosofia de las estructuras* (Toward a new philosophy of structures) and published in Buenos Aires in 1962, is the transcription of a famous conference delivered at Congress held in Mexico in 1951. In the other, a book published in Madrid in 1985, he selected a series of his own writings that he titled *En defensa del formalismo y otros escritos* (In defence of formalism and other papers.)

With the explicit aim of covering the wide range of Candela's international legacy, the city of Madrid invited universities in Spain and abroad to participate in this commemoration of the centenary of his birth. To this end, at the beginning of the academic year in September 2009, the Polytechnic University of Madrid's Schools of Architecture and Civil Engineering, in conjunction with the Fundacion Juanelo Turriano and the Instituto Tecnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC), called an international ideas competition for students of architecture and engineering, financed by SIKA España. The competition had three sections designed to familiarize students with Candela's oeuvre through analysis, and drawings, structural studies and scale models of their own. A total of 338 submissions were received (posters, drawings and scale models,) most authored by teams of students. In all, 588 students

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

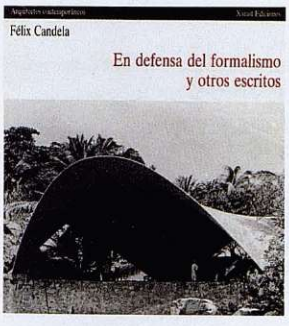


Portada del libro/*Book cover*
Félix Candela, 1962

Materiales y Construcciones INTEMAC convocó un Concurso Internacional de Ideas para estudiantes de arquitectura e ingeniería, que ha sido financiado por SIKA España. El concurso tenía tres apartados destinados a que los estudiantes conocieran la obra de Félix Candela a través de su análisis, realizando dibujos, estudios estructurales y maquetas. En total se han presentado 338 trabajos (carteles, dibujos y maquetas). En su mayoría han sido realizados por grupos de alumnos. El total de alumnos de diferentes países ha sido de 588, de universidades españolas (80%) y extranjeras (20%). Se han concedido seis premios: Cartel, 1º José Carpio Pinedo (ETSAM España), y 2º Juan José Suárez Santiago (ETSAM España); Dibujo, 1º Rubén Ramírez García (UNAM México), y 2º Miguel Jiménez Álvarez-Estrada (ETSAM España); Maqueta, 1º Víctor Alcalde Muñoz, Álvaro J. Álvarez Gutiérrez y Marcos González González (ETSAM España), y 2º Dan Reynolds (Princeton University EEUU).

Las universidades que han participado en el concurso y que están representadas en la exposición son:

- Españolas:
  Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (UPM)
  Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid (UPM)
  Universidad Camilo José Cela
  Universidad del Zulia
  Universidad Alfonso X
  Escuela de Arte y Superior de Diseño de Gran Canaria
  Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de Cantabria
  Escuela Técnica Superior de Arquitectos de Valladolid
  Escuela Técnica Superior de Arquitectura y Geodesia de Alcalá de Henares
  Escuela Superior IE de Segovia
  Escuela Técnica Superior de Arquitectura CEU de Madrid
  Escuela Universitaria de Obras Públicas de Madrid
- Internacionales:
  Universidad Nacional Autónoma de México (México)
  Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría de La Habana (Cuba)
  Università degli Studi del Molise, Facoltà di Ingegneria (Italia)



Portada del libro/*Book cover*
Félix Candela, 1985

participated from universities in Spain (80%) and abroad (20%). Six prizes were awarded: Poster: 1st, Jose Carpio Pinedo (Madrid School of Architecture, Spain), and 2nd, Juan Jose Suarez Santiago (Madrid School of Architecture, Spain); Drawing: 1st, Ruben Ramirez Garcia (National Autonomous University of Mexico), and 2nd, Miguel Jimenez Alvarez-Estrada (Madrid School of Architecture, Spain); Scale model: 1st, Victor Alcalde Muñoz, Alvaro J. Alvarez Gutierrez and Marcos Gonzalez Gonzalez (Madrid School of Architecture), and 2nd, Dan Reynolds (Princeton University, USA).

The universities participating in the competition and represented in the exhibition include:

- Spain:
  Polytechnic University of Madrid (Schools of Architecture and Civil Engineering)
  Camilo Jose Cela University
  Zulia University
  Alfonso X University
  School of Art and Design of Gran Canaria
  School of Civil Engineering of Cantabria
  School of Associate Architecture of Valladolid
  School of Associate Architecture and Land Surveying of Alcala de Henares
  IE University of Segovia
  CEU University of Madrid (School of Architecture)
  Madrid School of Public Works
- Abroad:
  National Autonomous University of Mexico, Mexico
  Jose Antonio Echeverria Polytechnic Institute of Havana, Cuba
  Faculty of Engineering, University of Molise, Italy
  Department of Architecture, Cornell University, USA
  Princeton University, USA
  Al-Baath University, Syria
  University of the Republic, Uruguay
  TUG Technical University of Berlin, Germany (participation with student term assignments)

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



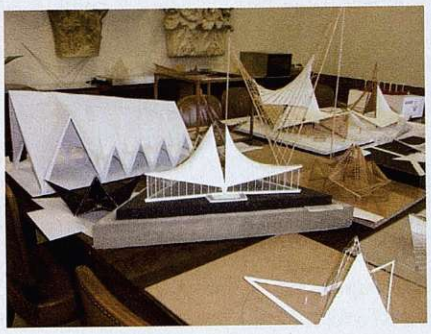


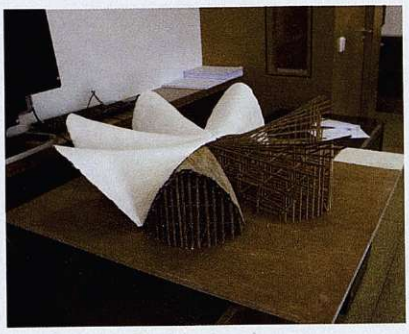
Jurado del concurso internacional de ideas
Jury Internacional Ideas Competition

Ricardo Aroca, José Calavera Ruiz, Pepa Cassinello, Ángel González Lucas, Enrique González Valle, Luis Maldonado Ramos, Bernardo Revuelta Pol, José Antonio Torroja

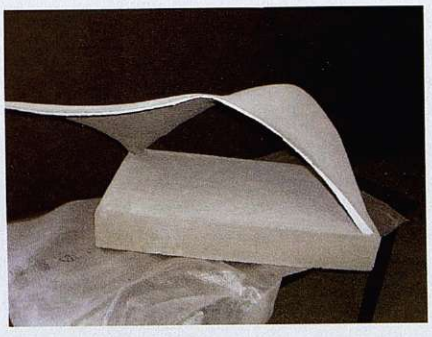
ETSAM-UPM, Madrid, 11 de enero de 2010







Maquetas presentadas
Submited models



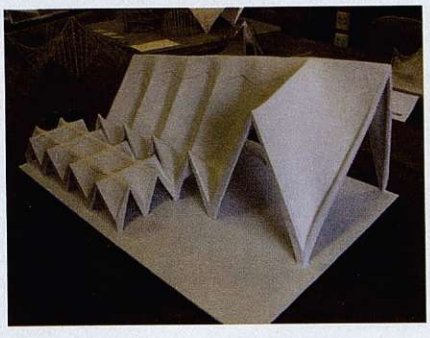


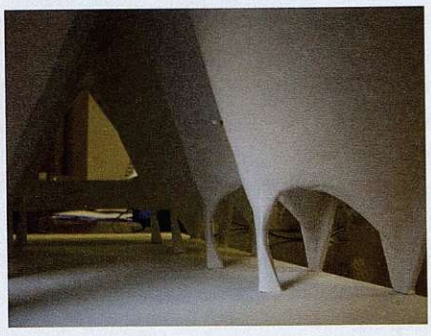
Primer Premio de Maquetas/*First Prize Models*

Autores/*Authors*
Víctor Alcalde Muñoz, Álvaro J. Álvarez Gutiérrez, Marcos González González

Universidad/*University*
Escuela Técnica Superior de Arquitectura (ETSAM)
Universidad Politécnica de Madrid (UPM),
España/Spain

Profesor/*Professor*
Roberto Clemente y apoyo del Laboratorio de Materiales ETSAM





Segundo Premio de Maquetas/*Second Prize Models*

Autor/*Author*
Dan Reynolds

Universidad/*University*
Princeton University, USA

Profesor/*Professor*
Maria Eugenia Moreyra Garlock

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

University of Cornell Department of Architecture en Ithaca NY (EEUU)
Princeton University en Princeton NJ (EEUU)
University of Al-Baath en Homs (Siria)
Universidad de la República de Uruguay en Montevideo (Uruguay)
TUG Techniche Universität de Berlín (Alemania) (participación en la exposición con trabajos de curso de sus alumnos).

Las colaboraciones de las universidades internacionales en esta exposición han estado especialmente apoyadas por diferentes profesores que han participado en este homenaje a Félix Candela, poniendo trabajos de curso sobre su obra y animando a los alumnos a participar en el concurso. Agradezco de manera especial su colaboración a John F. Abel, presidente de la Internacional Association for Shell and Spatial Structures, Dr. Ingeniero y profesor emérito de la Cornell University (EEUU); al profesor Jonathan Ochshorn del Departamento de Arquitectura de la Cornell University (EEUU); a Juan Gerardo Oliva Salinas, Dr. Ing. Arquitectura, Laboratorio de Estructuras del Centro de Investigaciones y Estudios de Postgrado de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México (México); a Mike Schlaich, Dr. Ingeniero y profesor de la Technische Universität de Berlín, Institut für Bauingenieurwesen (Alemania); a Maria Eugenia Moreyra Garlock y David P. Billington, profesores de Princeton University (EEUU); a Agostino Catalano, Dr. Ingeniero y profesor de la Università degli Studi del Molise Facoltà di Ingegneria (Italia); a Massimiliano Savorra, Dr. Ingeniero y profesor de la Università degli Studi del Molise, Facoltà di Ingegneria (Italia); a Nedal Satouf, Dr. Arquitecto y profesor del Department of Architectural Design, Faculty of Architecture, Al-Baath University (Siria).

En esta sala se expone una amplia selección de los 338 trabajos presentados por los alumnos, quedando representadas todas las universidades que han querido involucrarse y participar en este homenaje a Félix Candela.

Special support for foreign universities' participation in this exhibition was received from professors involved in this tribute to Felix Candela, who assigned term papers on his oeuvre and encouraged their students to take part in the competition. Thanks are owed in particular to John F. Abel, President of the International Association for Shell and Spatial Structures, Ph.D. in engineering, emeritus professor at Cornell University, USA; Professor Jonathan Ochshorn, Department of Architecture, Cornell University, USA; Juan Gerardo Oliva Salinas, Ph.D. architectural engineering, Structures Laboratory, Centre for Research and Post-graduate Studies, Faculty of Architecture, National Autonomous University of Mexico, Mexico; Mike Schlaich, Ph.D. engineering, Professor at the Institute for Construction Engineering, Technical University of Berlin, Germany; Maria Eugenia Moreyra Garlock and David P. Billington, professors at Princeton University, USA; Agostino Catalano, Ph.D. engineering, professor at the Faculty of Engineering, University of Molise, Italy; Massimiliano Savorra, Ph.D. engineering, professor at the Faculty of Engineering, University of Molise, Italy; Nedal Satouf, Ph.D. architecture, professor at the Department of Architectural Design, Faculty of Architecture, Al-Baath University, Syria.

A broad selection of the 338 posters, drawings and scale models submitted by students, with representatives from all the universities participating in this tribute to Felix Candela, are on exhibit in this room.

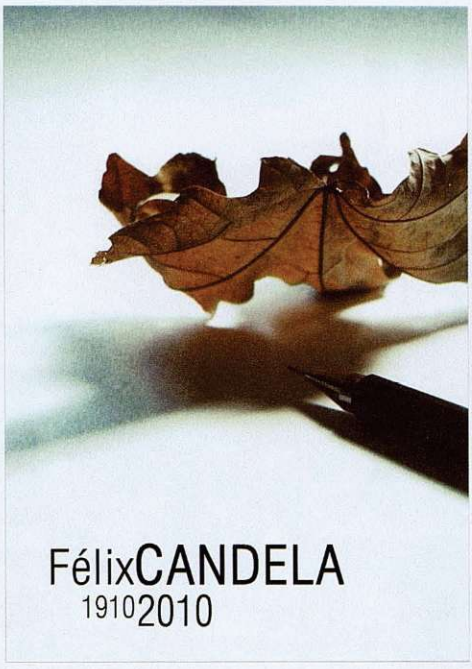
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

1º Premio Cartel/*1º Prize Poster*

Autor/*Author*
José Carpio Pinedo

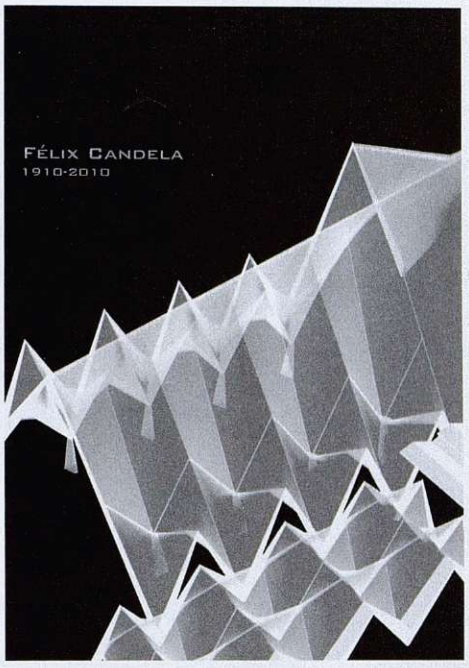
Universidad/*University*
ETSAM-UPM



2º Premio Cartel/*2º Prize Poster*

Autor/*Author*
Juan José Suárez Santiago

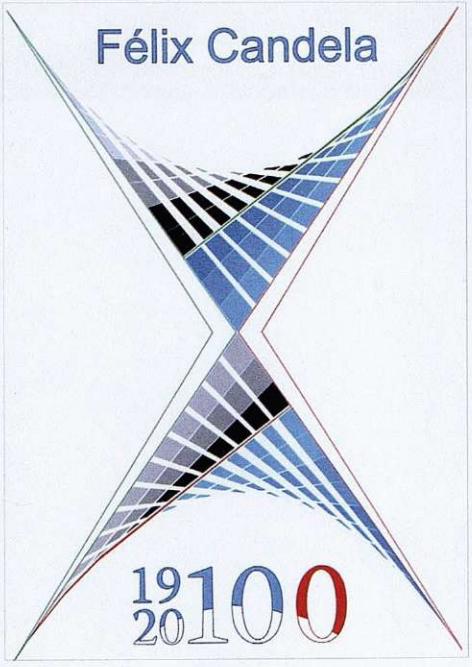
Universidad/*University*
ETSAM-UPM



1º Premio Dibujo/*1º Prize Drawing*

Autor/*Author*
Rubén Ramírez García

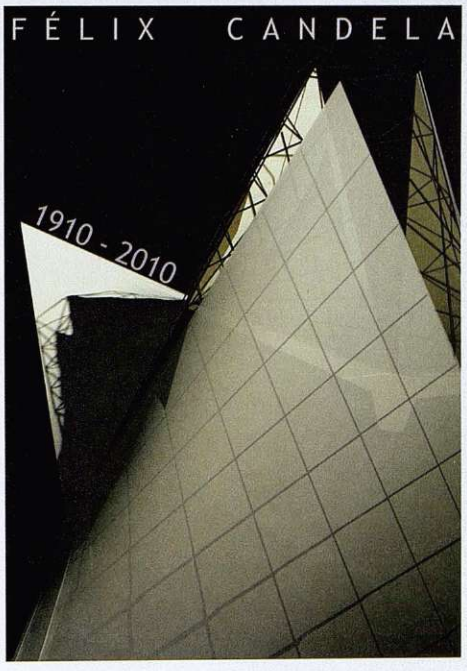
Universidad/*University*
UNAM, México



2º Premio Dibujo/*2º Prize Drawing*

Autor/*Author*
Miguel Jiménez Álvarez-Estrada

Universidad/*University*
ETSAM-UPM



FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

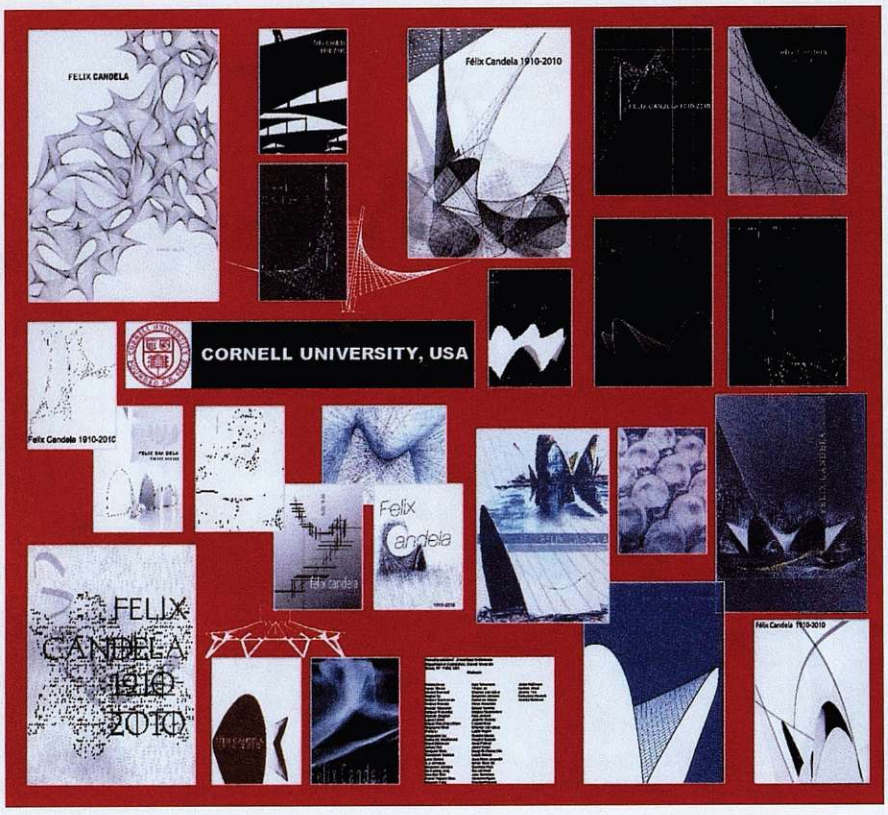
FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO



Universidad/*University*
ETSAM-UPM

Profesor/*Professor*
Carmen García Reig e Ismael García Ríos

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



Universidad/*University*
Cornell Univesity, EEUU

Profesor/*Professor*
Jonathan Ochshom

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO



Universidad/*University*
Universidad Nacional Autónoma de México. UNAM México

Profesor/*Professor*
Juan Gerardo Oliva Salinas

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



Universidad/*University*
Al-Baath University, Syria

Profesor/*Professor*
Nedal Satouf

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



Universidad/*University*
Università degli Studi del Molise, Italy
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid
Escuela Técnica Superior de Arquitectos de Valladolid
Universidad Camilo José Cela
Universidad del Zulia
Universidad Alfonso X
Escuela de Arte y Superior de Diseño de Gran Canaria
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de Cantabria
Escuela Técnica Superior de Arquitectura y Geodesia de Alcalá de Henares
Escuela Superior IE de Segovia
Escuela Técnica Superior de Arquitectura CEU de Madrid
Escuela Universitaria de Obras Públicas de Madrid

Maquetación/*Layout* de los cuatro paneles anteriores, Amelia Santana Cuello de Oro

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

1 CONTEXTO INTERNACIONAL DE LAS *THIN CONCRETE SHELLS*

INTERNACIONAL CONTEXT OF THE THIN CONCRETE SHELLS

Félix Candela en el contexto internacional de la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna: *Thin Concrete Shells*
PEPA CASSINELLO

Thin Concrete Shells and other Light-Weight Double-Curved Structures
MIKE SCHLAICH

Bolsa de Valores
México D.F., 1953

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Félix Candela en el contexto internacional de la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna: *Thin Concrete Shells*

Pepa Cassinello

Dr. Arquitecto. Profesora Titular del Departamento de Construcción
Subdirectora de Alumnos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura ETSAM
Universidad Politécnica de Madrid UPM, España

A la ilusión, esfuerzo y voluntad de Félix Candela



(F. 1)
Félix Candela

El 27 de enero de 2010 se cumple el centenario del nacimiento del célebre arquitecto de origen español Félix Candela (1910-1997), que se licenció en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid en 1935. Félix Candela es uno de los más destacados protagonistas de "la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna". Adquirió su fama internacional a través de la construcción de cascarones de hormigón armado –*Thin Concrete Shells*–, a los que dotó no sólo de una racional y óptima forma resistente sino también de una impactante y escultural belleza.

Desde su exilio en México, Félix Candela se capacitó en el conocimiento de estas nuevas formas arquitectónicas realizando cascarones experimentales a tamaño natural. En 1950 fundó en México su propia empresa, Cubiertas Ala, y durante casi dos décadas, construyó más de 800 cascarones de hormigón armado, convirtiéndose, a través de su propio esfuerzo e ilusión, en un referente obligado de esta apasionante historia.

Introducción

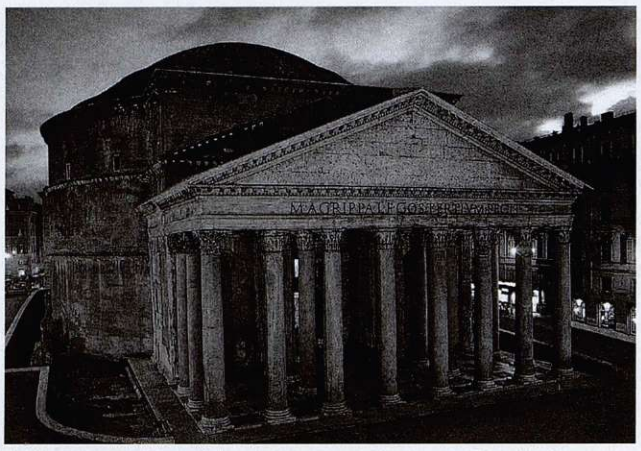
Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad.
Albert Einstein (1879-1955)

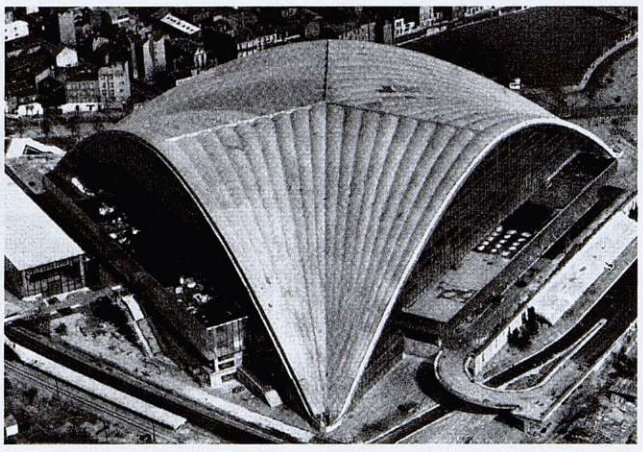
Siempre me ha parecido un curioso presagio el hecho de que el hormigón armado naciera con forma de estructura laminar, porque después de darle forma a todo tipo de elementos estructurales, tras más de 70 años de vida, de alguna manera, volvió a su forma original. En efecto, pese a su escasa esbeltez y tamaño, uno de los primeros precedentes construidos en hormigón armado, que se conocen, son las pequeñas macetas para rosales que construyó el jardinero francés Joseph Monier en 1849 (F. 2), utilizando cemento armado, así como la barca proyectada por Joseph-Louis Lambot en 1848, que fue construida en 1855.

Es sobradamente conocida la larga y relevante historia acaecida a partir de este momento, en el cual es presentada la primera patente de hormigón armado, en la Exposición Internacional de París celebrada en el año 1855 [1]. A nivel mundial, como reguero de pólvora, se extendió el nacimiento de este nuevo material, que por sus características físicas y mecánicas, aún pendientes de conocer y evolucionar, estaba destinado a revolucionar el mundo de la construcción de la Ingeniería y la Arquitectura. Pero pese a los relevantes avances técnico-científicos alcanzados en poco tiempo, así como a la enorme cantidad de innovadoras construcciones realizadas en hormigón armado desde finales del siglo XIX, fueron necesarios más de 70 años de investigación y experiencia, para asistir al nacimiento de la primera estructura laminar –*Thin Concrete Shell*–. En efecto, tras este largo periodo de siete décadas, el hormigón armado volvió a sus orígenes, y una vez capacitado para hacerlo, inició la aventura de cambiar de escala aquellas pequeñas macetas laminares, que adoptando muy diferentes formas geométricas y tamaños, se convirtieron en uno de los más venerados hitos de la Arquitectura Moderna. Un cambio de escala, que como todos los ocurridos en la Historia, produjo un sinfín de problemas, poniendo de manifiesto, una vez más, la no siempre conocida e inquietante "debilidad de los gigantes".

Fue en la segunda década del siglo XX cuando realmente se inició, lo que sin duda podemos llamar, "La Aventura Laminar", en la que ingenieros y arquitectos se unieron, enlazados como eslabones de una misma cadena, forjada para la búsqueda de la más *eficaz, desnuda y esbelta forma laminar resistente*, en un intento de conquistar la nueva libertad de forma y tamaño, que este

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





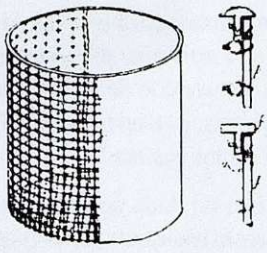
(F. 3)
Panteón de Agripa en Roma (43m)
(F. 4)
CNIT de París (280m)

material les ofrecía, unida al nuevo sentir, que en esa misma década, hizo nacer la Modernidad, como un nuevo modelo de pensamiento que será reconocido siempre a través de la posterior y famosa frase atribuida a Mies van der Rohe: *"Less is More"*. [2]

Las internacionalmente conocidas como las *Thin Concrete Shells*, pueden ser definidas con un conjunto de eficaces y desnudas formas espaciales, construidas en hormigón armado y/o pretensado, en las que el espacio habitable esta definido por la propia forma geométrica de la estructura laminar en sí misma, que se constituye, en un solo gesto, en piel y estructura de la Arquitectura que define, generando una nueva y moderna imagen escenográfica en la ciudad. Unas formas espaciales en las que se cumplían, de forma tajante y rotunda, los cinco puntos fundamentales definidos por Le Corbusier para la Arquitectura Moderna. Y además, tal y como Félix Candela señaló [3], fue en ellas –las *Thin Concrete Shells*– donde el hormigón armado encontró la más racional manifestación de su razón de ser, optimizándose el aprovechamiento de sus características formáceas y adecuo-resistentes. En cuanto a la perseguida esbeltez y belleza de los cascarones de hormigón armado, Félix Candela fue uno de los más relevantes protagonistas de esta Historia, convirtiéndose en poco tiempo en el paradigma de la delgadez laminar e imagen escultural de las *Thin Concrete Shells*, convirtiendo su trabajo en un verdadero Arte.

En referencia al tamaño, tras un largo periodo de experimentación y análisis, en diferentes países, no solo sobre la propia obra construida de diferentes autores, sino sobre el entonces necesario apoyo en los modelos físicos reducidos, consiguieron controlar los problemas surgidos por el cambio de escala en cada forma geométrica específica, y finalmente, el hormigón armado y el pretensado, permitieron construir nuevas formas espaciales continuas de más de 200m de luz entre apoyos, dejando muy atrás los poco más de 40m alcanzados con las formas espaciales construidas con fábricas históricas, o los 60m alcanzados con láminas ejecutadas con fábricas tabicadas armadas. En efecto, aunque con diferentes formas geométricas, de los 43m de diámetro de la cúpula del Panteón de Agripa en Roma (F. 3), máxima luz de vano libre alcanzada con fábricas antiguas, se llegó a los 280m de luz de vano entre apoyos en la estructura laminar de hormigón armado del CNIT de París (F. 4).

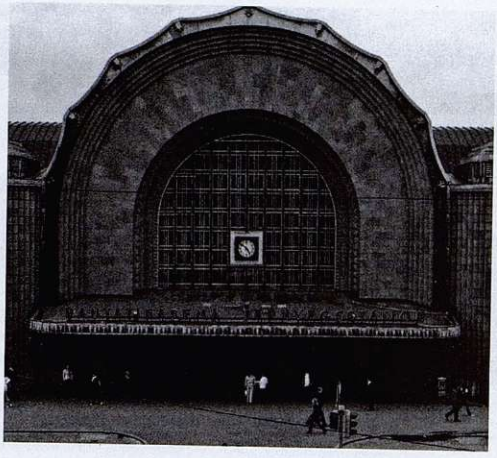
Trascurridos 50 años desde su aparición, y aunque hasta finales de la década de los años setenta, todavía continuaron construyéndose algunas estructuras laminares de hormigón, "la Aventura Laminar" de las *Thin Concrete Shells* terminó al final de la década de los años 60, una vez conquistada la cima de esa nueva libertad, en unos momentos en los cuales su razón de ser empezaba a extinguirse ante la llegada de nuevos materiales, que ya se abrían camino en un contexto internacional que era muy diferente desde el punto de vista económico, social y tecnológico. Unos momentos en los cuales, ya empezaban a aparecer nuevos caminos que conquistar en el campo de las Estructuras Espaciales. No en vano, la Internacional Asociation for Shells Structures IASS, fundada por Eduardo Torroja en Madrid en 1959, a finales del 1969, ante la escasa aparición de nuevas *Thin Concrete Shells*, y aprovechando las mismas siglas y logotipo de la asociación, pasó a llamarse, en el año 1970, Internacional Asociation for Spatial and Shell Structures, ocupándose desde entonces, de un campo más amplio, en el que tienen cabida todas las estructuras espaciales, en cuyo proyecto y construcción pronto se integraron nuevos materiales, que como el vidrio, protagonizan hoy las más relevantes construcciones de la vanguardia arquitectónica del siglo XXI. [4]

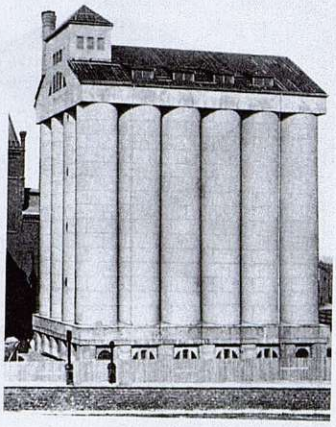


(F. 2)
Maceta. Monier, 1849

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO







(F. 5)

Bürkliplatz Pavillion
Zúrich, 1908
Robert Maillart

(F. 6)

Estación Central
Helsinki, 1009-1911
Gottlieb Eliel Saarinen

(F. 7)

Silos
Bremen, 1910
Drenckahn y Sudhop

Antecedentes e inicio de la Aventura Laminar (1908-1922)

Las variadas aportaciones de cada uno de los protagonistas de esta "Aventura Laminar", se ponen de manifiesto, por sí mismas, cuando son analizadas dentro del contexto internacional en el que se produjeron, pudiendo así ser entendidas y valoradas como parte inseparable de la encadenada historia de la conquista formal y tecnológica de las *Thin Concrete Shells* de la Modernidad, que en cada específico momento y lugar se vieron racionalmente forzadas a adecuar su forma geométrica a los avances alcanzados sobre el hormigón armado, sus sistemas de cálculo y comprobación, las técnicas de construcción, así como al entorno social, laboral y económico en el que se desarrollaron.

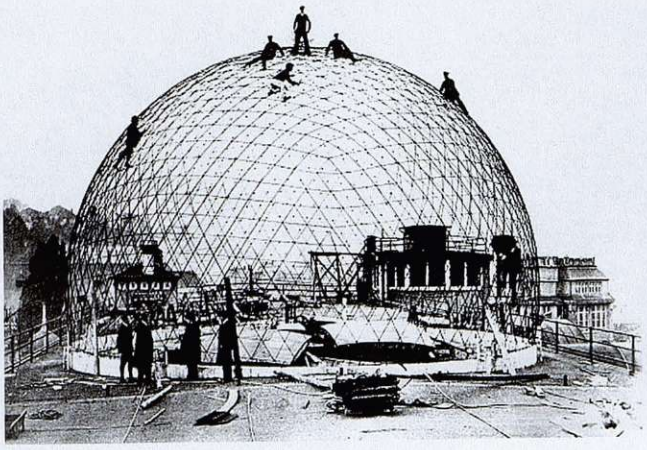
Félix Candela Outeriño nació el 27 de enero de 1910 en Madrid (España), cuando todavía no había sido construida la que se considera, de forma internacional, como primera *Thin Concrete Shell*, aunque sí algunos de sus más relevantes precedentes. En 1908, el ingeniero suizo Robert Maillart (1872-1940), que años más tarde participaría en la aventura de las *Thin Concrete Shells*, había inventado el forjado fungiforme, y construido el Bürkliplatz Pavillion en Zúrich (F. 5), con una pequeña cubierta cupular de hormigón armado, que, aunque todavía conservaba reminiscencias historicistas y escaso tamaño y esbeltez, es posiblemente uno de los primeros precedentes de cúpulas de hormigón armado utilizadas como cubierta arquitectónica.

En 1909, tras abandonar el proyecto realizado por John Monash, en el que estaba prevista la utilización de la patente de Monier, se adjudicó a Swanson Brothers la Public Library de Melbourne, utilizándose finalmente la patente de la Trussed Concrete Steel Co. of England en la construcción de una cúpula de hormigón armado de 34,8m de diámetro, la de mayor tamaño construida en el mundo en aquellos momentos, con este nuevo material. Sin embargo, era casi 10 metros menor que la cúpula del Panteón de Agripa en Roma. Otro ejemplo de grandes cubiertas en las que desde principios de siglo se utilizó el hormigón armado es la cubierta de la Estación Central de Helsinki, proyectada por Gottlieb Eliel Saarinen (1873-1950) en 1909 e inaugurada en 1911 (F. 6). Se trata de una cubierta de cañón corrido cilíndrica, proyectada para la remodelación de la antigua estación.

Pero en estos precedentes de cubiertas de hormigón armado, el comportamiento estructural no era todavía el de una lámina, sino el de una pesada y gruesa bóveda de hormigón armado. Este nuevo material no hacía sino imitar las formas geométricas espaciales ejecutadas con fábricas antiguas de piedra y ladrillo, porque todavía no había encontrado su propio camino. La historia de las denominadas *Thin Concrete Shells* reconoce como su primer referente la bóveda laminar en la cubierta de la Estación de Bercy-París construida por el ingeniero francés Simon Boussiron (1873-1958) en el año 1910 [5]. Se trata de una bóveda de cañón de directriz parabólica, de 8cm de espesor y 10m de luz, en la que realmente la esbeltez de la pieza puede ser reconocida como el inicio de una historia marcada por la continua y frenética búsqueda de la máxima esbeltez de los cascarones de hormigón armado.

Por otra parte, dada la resistencia a la flexión, a la corrosión y al fuego con las que contaba el hormigón armado, desde un principio, los silos de grano, los tanques de gas y depósitos de agua, fueron un tipo de construcciones muy propicias para ser construidas con este nuevo

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 8)

Test del Planetario de la Universidad de Jena (Alemania)en 1922

(F. 9)

Planetario e Instituto de Astrofísica de la Universidad de Jena (Alemania), 1925 Dyckerhoff y Widmann

material, pese a que en aquellos momentos representaba un alto coste. A este respecto, el *Handbuch für Architektur* (Manual de Arquitectura) publicó en el año 1900 diversos escritos que manifestaban la costosa ejecución de obras con hormigón armado, aludiendo al hecho de que hasta que el cemento Portland no fuera más barato, y hasta que no se patentaran apropiados sistemas de construcción, no se podría utilizar este nuevo material de forma generalizada, para todo tipo de construcciones. Las primeras empresas de ingeniería que se lanzaron a "la Aventura Laminar" fueron de nacionalidad alemana, y, en efecto, este tipo de construcciones (silos, depósitos, tanques, tuberías...) ligadas a fábricas e infraestructuras fueron las primeras que construyeron. Entre estas empresas alemanas destacan, por su histórica aportación al desarrollo y construcción de las estructuras laminares de hormigón armado y pretensado, Wayss y Freytag, Drenckahn y Sudhop (F. 7) y Dyckerhoff y Widmann. En 1911, es el arquitecto Max Berg (1870-1947) y la empresa de ingeniería alemana Dyckerhoff y Widmann quienes construyeron la Cúpula del Siglo en Breslau (Polonia) (F. 10). La cúpula tenía un diámetro de 65m y una flecha de 42m. Se trataba de una cubierta ejecutada en hormigón armado cuyo comportamiento estructural, al igual que en el caso de la Public Library de Melbourne, no era el de una lámina, sino el de una estructura esférica de barras.

Cuando Félix Candela era tan sólo un niño, en 1922-1923 la empresa Dyckerhoff y Widmann construyó la primera *Thin Concrete Shell* en Jena (Alemania) (F. 9). Una lámina geodésica de unos 16m de diámetro y 3cm de espesor, ejecutada en hormigón armado proyectado por anillos paralelos, sobre un armazón espacial reticulado, de nudos rígidos, formado por barras metálicas [6]. En 1925 se construyó el Planetario de Jena (F. 8). Esta pionera estructura laminar fue el resultado de la colaboración entre los ingenieros Franz Dischinger (1887-1953), de la empresa Dyckerhoff y Widmann, de Walter Bauersfeld (1879-1959), de la empresa de ingeniería Carl Zeiss, y de los arquitectos Hans Schlag y Johannes Schreiter. El sistema de construcción utilizado fue patentado (Z-D) [7] y diez años más tarde introducido en Estados Unidos por Anton Tedesco, que fue también ingeniero de la empresa Dyckerhoff y Widmann.

A partir de este momento, Dyckerhoff y Widmann, que ya contaba con múltiples experiencias en construcciones de hormigón armado, se convierte en lider internacional del pionero desarrollo de las estructuras laminares. En su equipo reunió, generación tras generación, a los más prestigiosos y sobresalientes ingenieros, formándoles en los más innovadores conocimientos. Dyckerhoff y Widmann no sólo difundió sus relevantes investigaciones en este campo, como la famosa prueba de carga realizada por Franz Dischinger sobre una cubierta laminar de doble curvatura, en la que la carga fueron 50 hombres, sino que construyó numerosos y variados tipos de estructuras laminares que cada vez alcanzaron mayor luz de vano y esbeltez. Entre otras muchas: las láminas cilíndricas que forman la cubierta del Gran Mercado de Fráncfort (1926-1927), proyectado por el arquitecto Martin Elsässer y los ingenieros Franz Dischinger y Ulrich Finsterwalder; la lámina cupular del Mercado de Leipzig (1927-1929) con un diámetro de 32m, proyectada por el arquitecto Hubert Ritter y los ingenieros Franz Dischinger y Hubert Rüsch (1904-1979), que trabajó en la empresa desde 1926 hasta 1948; y la gran cúpula del Mercado de Basilea (1929), proyectada por el arquitecto Hans E. Ryhiner y los ingenieros Franz Dischinger y Alfred A. Göenner, con un diámetro de 60m y un espesor de 8cm (F. 11). Las cubiertas lamina-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 10)

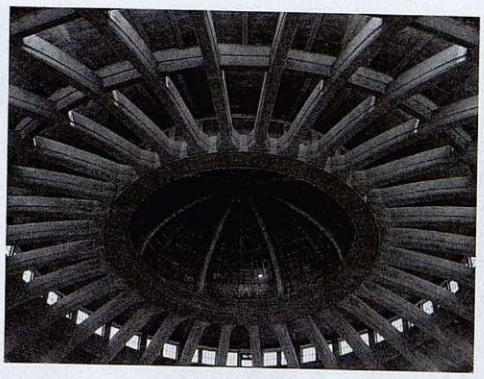
Cúpula del Siglo
Breslau (Polonia), 1911
Max Berg/Dyckerhoff y Widmann

(F. 11)

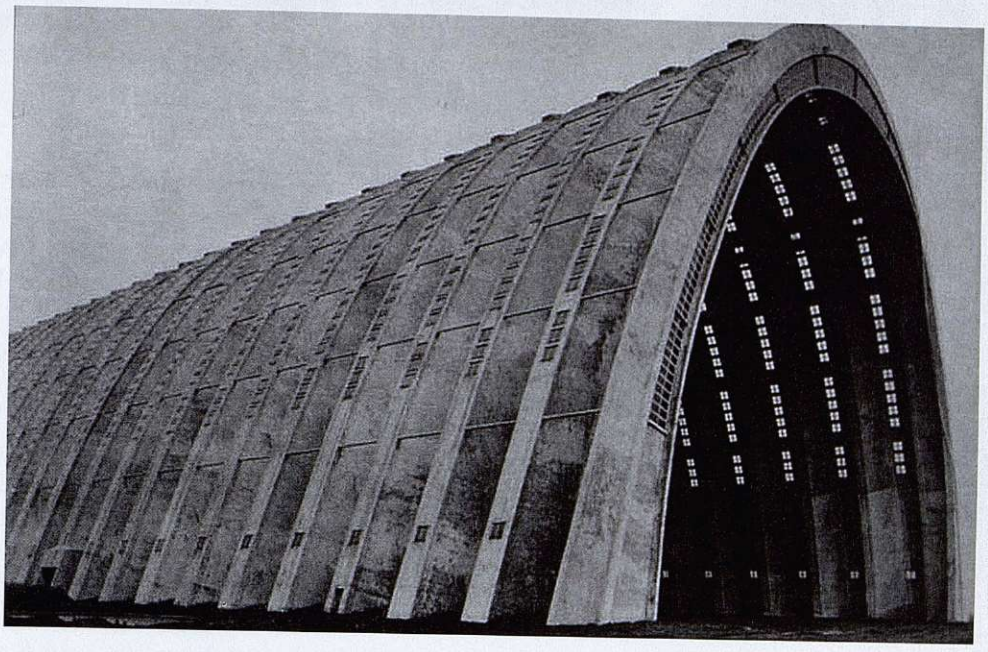
Mercado
Basilea (Suiza), 1929
Hans E. Ryhiner, F. Dischinger
y A. Göenner, Dyckerhoff y Widmann

(F. 12)

Hangares
Orly (Francia), 1921-1923
Eugène Freyssinet







res de estos tres grandes mercados demuestran como a finales de la década de los años 20 ya se había alcanzado un gran conocimiento y experiencia en la construcción de cascarones de hormigón armado, siendo capaces, como en el caso del Mercado de Basilea, de salvar vanos de 60m con tan sólo 8cm de espesor de lámina de hormigón armado.

Por otra parte, es también a finales de la década de los años 20, cuando el conocimiento alcanzado sobre el hormigón armado desemboca en la aparición de otro nuevo material –el hormigón pretensado–, cuyo posterior desarrollo permitió incrementar las posibilidades de forma y tamaño de las *Thin Concrete Shells*. Fue el ingeniero francés Eugène Freyssinet (1879-1962) quien registró en París, en 1928, la primera patente de hormigón pretensado, tras haber pretensado ya algunas de sus más famosas obras, al igual que hiciera el pionero ingeniero español Eduardo Torroja, cuyo particular ingenio le permitió adelantarse a los acontecimientos [8]. Las múltiples patentes y obras realizadas por Freyssinet impulsaron el desarrollo no sólo de nuevas técnicas y sistemas constructivos sino también la aparición de nuevos tipos de estructuras laminares. Entre 1921 y 1923 construyó los famosos Hangares de Orly (F. 12), unas láminas de cañón corrido de directriz parabólica, cuya forma ondulada incrementaba la rigidez de la forma resistente de su conjunto, y en las que empleó por primera vez la nueva técnica de vibrado que había inventado en 1917. Posteriormente, en 1925, construyó la cubierta laminar de los Talleres de reparación de Bagneux, y en 1928 la lámina de cañón del Gran Mercado de Reims, de directriz parabólica, fragmentada por lucernarios en la dirección transversal al cañón, dada su evidente forma de trabajo laminar en arco.

En este especial e innovador contexto internacional, en el que además de haberse iniciado "la Aventura Laminar" aparece en escena un nuevo material –el hormigón pretensado–, es cuando Félix Candela ingresa en la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Madrid, y cuando el joven ingeniero español Eduardo Torroja, que llegaría a liderar a nivel internacional el

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 13)
Félix Candela

desarrollo del hormigón y de las estructuras laminares, se independiza fundando su propia oficina en Madrid, tras haber trabajado sus primeros cuatro años en la Compañía de Construcciones Hidráulicas Civiles bajo la dirección de su profesor Eugenio Ribera.

En 1928 también se inicia otra gran aventura, la Modernidad, declamada de forma internacional a través de la celebración del primer Congreso Internacional de Arquitectura Moderna CIAM [9]. Un hecho que marcaría la trayectoria profesional de todos los protagonistas de esta historia, entre ellos la de Félix Candela, que en 1929 ingresó en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (F. 13).

La Modernidad y las *Thin Concrete Shells* (años 30)

El nacimiento y difusión de la Modernidad, unido al desarrollo del hormigón armado y pretensado, provocaron que "la Aventura Laminar" tuviera un claro y dual objetivo, *la conquista de la esbeltez de la más desnuda y eficaz forma resistente* que estos nuevos materiales podían llegar a alcanzar. Un esfuerzo en el que, en todo momento, fue necesario racionalizar el proceso de construcción de estas nuevas formas resistentes, optimizando su coste en cada específico lugar.

En la década de los años 30, el ingeniero suizo Robert Maillart construyó sus más innovadores y esbeltos puentes de hormigón armado, como el Puente Salginatobel (1930), en los que utilizó esbeltas estructuras en lugar de pesados y robustos arcos para soportar el tablero [10] (F. 14). Maillart creó una nueva estética estructural en los puentes de hormigón armado construyéndolos con piezas de pequeños espesores que parecen flotar en el paisaje siguiendo geometrías puras, limpias, desnudas, casi inmateriales, que respondían a las nuevas tendencias de la Arquitectura Moderna. Las aportaciones de Maillart, fueron también decisivas en los inicios del hormigón armado para entender el proceso de la búsqueda de la forma resistente más adecuada con la utilización de este nuevo material. Lamentablemente, la única estructura laminar arquitectónica que se conoce de Maillart es el Pabellón de la Exposición Nacional Suiza, proyectada en 1938 e inaugurada un año después. Esta desaparecida lámina de hormigón armado fue la demostración más eficaz de las posibilidades que ofrecían las nuevas estructuras ligeras, tal y como anteriormente Maillart había publicado en 1931 (Schweizerische Bauzeitung, 19 septiembre 1931). La lámina de Maillart se recortaba en el horizonte resaltando la esbeltez de su masa laminar al igual que lo hicieron sus famosos puentes (F. 15).

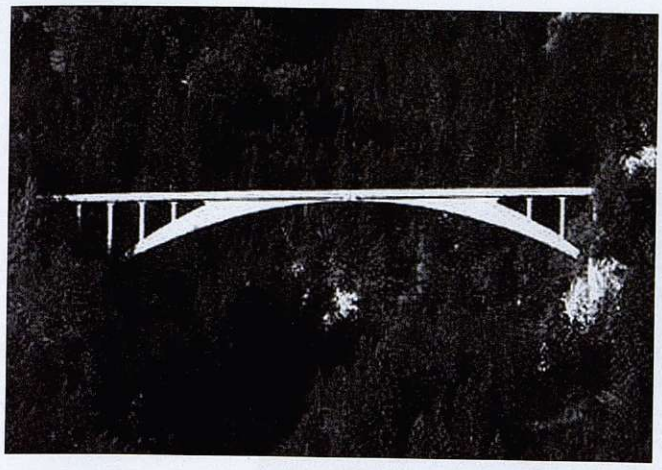
Años más tarde, cuando en 1972 Félix Candela fue invitado por David Billington a la Universidad de Princeton, con motivo del centenario de Robert Maillart, manifestó que había sido precisamente Maillart una de las más intensas y decisivas influencias que él había tenido. Félix Candela explicó entonces, una vez más, cómo se había especializado en la construcción de las *Thin Concrete Shells* a través de la lectura de los escasos escritos en los que algunos de los grandes maestros del hormigón armado, tenían la inhabitual generosidad de hablar con claridad sobre los aspectos fundamentales del diseño estructural que este material imponía por sus propias características.

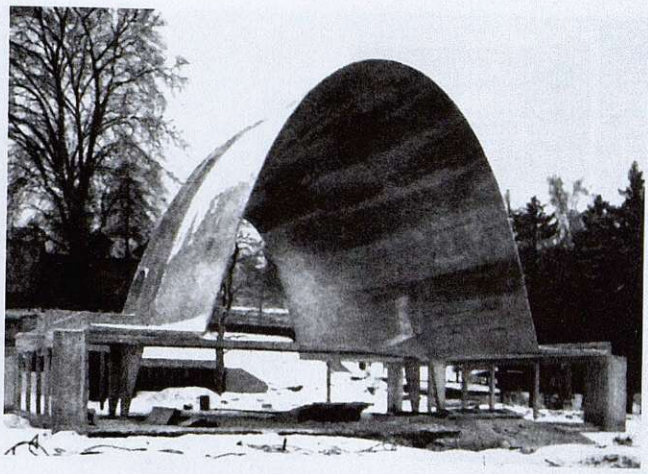
"Aunque tuve que aprender por mi cuenta, sin ayuda directa de universidades o despachos de proyectos, estoy en deuda con muchas personas que me ayudaron indirectamente con sus escritos. Uno de los más importantes acreedores es Maillart"

En este mismo contexto histórico, el nuevo sentir de la Modernidad produjo las mismas melodías en el mundo de las Bellas Artes que en la Ingeniería y la Arquitectura. La pintura y la escultura se hicieron eco del mismo lema, *"Less is More"*. Optimizaron el uso del material, generando esculturas laminares que, en manos de algunos de sus máximos representantes, como Henry Moore, contribuyeron a la difusión de este radical cambio, tal y como señaló Max Bill [11].

En la escena de la Arquitectura y la Ingeniería cada vez iba apareciendo un mayor número de pioneros para contribuir al desarrollo secuencial y encadenado de la "Aventura Laminar". El ingeniero francés Simon Boussiron (1873-1958), autor de algunas de las primeras estructuras laminares de hormigón armado, fundó en 1899 su propia empresa, A. Mollet y Boussiron, proyectando y construyendo muy diferentes e innovadoras obras de ingeniería civil y representativas estructuras laminares, entre ellas los Hangares de Karouba en Bizerte (Túnez) en 1932, los famosos Hangares para aviones proyectados por Auguste Perret y Nicolas Esquillan en Marignane (Francia) en 1950, o la más grande estructura laminar nunca construida, el CNIT de París (1957-10958), en la que intervinieron Robert Camelot, Jean de Mailly, Bernard H. Zehrfuss, Nicolas Esquillan, Balency y Schuhl, Boussiron, y Coignet. Otro de los más vanguardistas ingenieros franceses, que contribuyeron de forma relevante al desarrollo de las estructuras laminares de la Modernidad, fue el célebre Nicolas Esquillan (1902-1989), que en el año 1923 empezó

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 14)

Puente Salginatobel
Schiers (Suiza), 1930
Robert Maillart

(F. 15)

Pabellón de la Exposición Nacional
Suiza, 1939
Robert Maillart

a trabajar para Simon Boussiron, ocupando el puesto de jefe de diseño de A. Mollet y Boussiron en el año 1936, y años más tarde, en 1941, el de director técnico de la firma.

Otro ingeniero francés que sin duda realizó interesantes aportaciones fue Bernard Lafaille (1900-1955) [12], que desarrolló novedosos tipos estructurales y sistemas constructivos, patentando también pioneros elementos prefabricados de hormigón armado. Colaboró como ingeniero proyectista y asesor de gran número de arquitectos de la vanguardia moderna, como Le Corbusier, Robert Camelot, Guillamet Waistcoat, Jean de Mailly, Bernard Louis Zehrfuss... En la arquitectura laminar aportó nuevas formas colgadas, trabajando a tracción, como el famoso Pabellón de Francia en la Feria Internacional de Zagreb, construido en 1937 con el arquitecto Robert Camelot. Se trataba de una original cubierta laminar colgada formada por un cono invertido.

En esta década de los años 30, el italiano Giorgio Baroni construyó algunas de las primeras estructuras laminares en las que se usó la forma geométrica del paraboloide hiperbólico a modo de paraguas [13]: Hall de la Fonderie en Milán (1934), Entrepôt des usines de Alfa-Romeo en Milán (1937), Entrepôt de Ferrare (1938)... Pero fue Félix Candela, en la década de los años 50, quien utilizó de forma magistral la geometría del paraboloide hiperbólico, generando esbeltos paraguas y un sinfín de nuevas formas, producto de la macla espacial de muy diferentes fragmentos, girados, inclinados e intersecados entre sí.

De forma paralela al desarrollo del conocimiento del hormigón armado y pretensado (cálculo, puesta en obra, fabricación y sistemas constructivos) fueron evolucionando las estructuras laminares, apareciendo paulatinamente mayor número de tipos estructurales y constructivos. Fue también en 1930 cuando el célebre y polifacético ingeniero francés Albert Caquot (1881-1976) [14] explicó las razones por las cuales la teoría de la elasticidad no era suficiente para el diseño de nuevas estructuras en hormigón armado. Aunque fue conocido fundamentalmente por sus relevantes aportaciones a la aeronáutica y la ingeniería, desarrolló también sistemas de cálculo para el hormigón armado, e intervino como ingeniero en el proyecto de la estructura de hormigón armado del monumental Cristo de San Paulo, "el Pan de Azúcar" en Brasil (1931), así como en la construcción de algunas novedosas estructuras laminares, como la Cúpula del Mercado de Sidi bel Abbes, proyectada con el arquitecto M.J. Mauri y el ingeniero Considère. Una cúpula construida con grandes dovelas prefabricadas de hormigón armado.

En 1935, el ingeniero Ove Nyquist Arup (1895-1988), proyectó en Londres una piscina para pingüinos en el Regent's Park de Londres, en la que construyó un sistema de rampas laminares de hormigón armado, que pronto se convirtieron en otro de los iconos de la historia laminar [15] (F. 16). Tres años después, en 1938, fundó con su primo Arne Arup la firma de ingenieros constructores Arup y Arup. Posteriormente, en 1946 fundó otra empresa Ove Arup y Partners, que desde su fundación, continúa liderando el mundo de la construcción civil y arquitectónica. Entre 1952 y 1972, Ove Arup y Partners adecuó la estructura laminar de la famosa y polémica Ópera de Sidney, haciendo posible la construcción de la bella imagen proyectada por el arquitecto Utzon, que se convirtió en símbolo ya no de la ciudad sino de Australia, pero que tan ferozmente fue criticada, entre otros muchos por el entonces ya consagrado arquitecto Félix Candela [16].

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 16)

Ove Arup ante su piscina en el zoo de Regent's Park, Londres en 1988



Félix Candela fue un gran admirador y amigo personal de Ove Arup, a quien consideraba el legítimo sucesor de Robert Maillart, tal y como puso de manifiesto en 1964, en su escrito de homenaje al cumplimiento de los 75 años de su empresa. En esta ocasión, Félix Candela quiso resaltar fundamentalmente uno de los aspectos que más admiraba del célebre ingeniero, y el que sin duda compartieron y comparten todos los grandes maestros de la historia de la Arquitectura, incluido él mismo. Se trata del hecho de que tanto la Arquitectura como la Ingeniería nacen para ser construidas, y no para quedarse atrapadas en un simple dibujo, por bello que éste pueda llegar a ser. A este respecto Félix Candela escribió entonces refiriéndose a Ove Arup: "... y con ello quiero decir que cuando su mano está dibujando, su mente está siempre preocupada con el procedimiento de ejecutar la obra. Ésta es la principal diferencia entre un aficionado y un profesional". [17]

Entre los muchos profesionales que aparecen en escena en esta década de los años 30 destaca, de forma muy especial, el ingeniero español Eduardo Torroja Miret (1899-1961), que no se limitó a construir innovadoras estructuras laminares de muy diversos tipos sino que lideró, a nivel internacional, los avances técnicos y científicos del hormigón armado y pretensado, así como del desarrollo científico de los ensayos sobre modelos físicos reducidos. En 1930, en unos momentos en los cuales todavía estaba pendiente la conquista de las estructuras laminares, Eduardo Torroja fundó la empresa Investigaciones de la Construcción ICON, que bajo su dirección se especializó en el ensayo de modelos como método de análisis del comportamiento estructural de nuevas formas resistentes. Ello le permitió no sólo lanzarse a la realización de importantes estructuras laminares en unos momentos en los que no existían métodos fiables de cálculo para este tipo de estructuras sino desarrollar un método científico del análisis estructural utilizando modelos físicos. Fueron famosos los modelos que realizó de las cubiertas del Mercado de Algeciras y del Frontón Recoletos, ambos construidos a escala 1:10 y construidos en microhormigón. Pronto fue reconocido, a nivel internacional, como el "padre" de los ensayos científicos sobre modelos reducidos, contribuyendo a disipar uno de los mayores problemas que por aquel entonces presentaba el desarrollo proyectual de nuevas formas laminares de hormigón armado y pretensado, ofreciendo un sistema fiable de comprobación de su comportamiento estructural.

Poco tiempo después, en 1934, Eduardo Torroja, ante la precaria existencia de centros y de dotación para la investigación que había en aquellos momentos en España, fundó en Madrid el Instituto Técnico de la Construcción y Edificación junto a un pequeño grupo de ingenieros y arquitectos españoles [18]. Un Instituto que no sólo impulsó el desarrollo de aquella deprimida España sino que llegó a liderar, a nivel internacional, el desarrollo del hormigón armado y pretensado, así como el destino de las estructuras laminares, fundándose en 1959, por iniciativa de Eduardo Torroja, la *International Association for Shell Structures*. [19]

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 17)

Mercado
Algeciras, 1934
Eduardo Torroja

(F. 18)

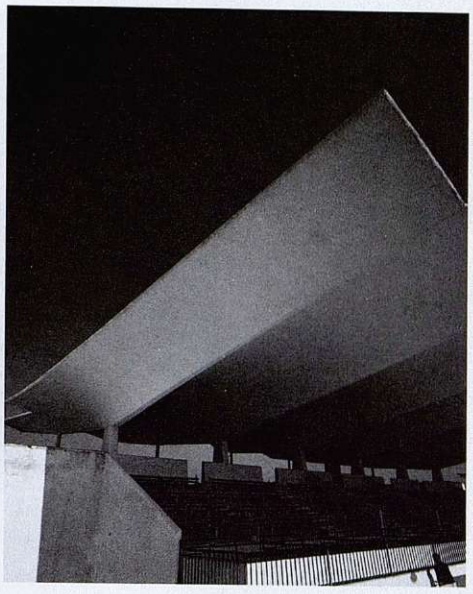
Frontón Recoletos
Madrid, 1935
Eduardo Torroja

(F. 19)

Hipódromo de la Zarzuela,
Madrid, 1935
Eduardo Torroja







Entre las innovadoras estructuras lamines construidas por Eduardo Torroja en la década de los años 30 están: el Mercado de Algeciras (1934), para el que proyectó una cubierta laminar en forma de casquete esférico de 47,62m de luz y 9cm de espesor, sustentada sobre ocho apoyos perimetrales, inventando la técnica de desencofrar mediante zunchado (F. 17); el Frontón Recoletos de Madrid (1936), cuya cubierta estaba formada por una estructura laminar generada por la intersección de dos sectores de cilindros circulares de 12,20m y 6,40m (sección transversal "en gaviota"), salvando una luz de 55m entre los muros testeros de cierre con un espesor de tan sólo 8cm (F. 18); y el Hipódromo de la Zarzuela de Madrid (1935), cuya marquesina es una estructura laminar formada por la sucesión de hiperboloides de eje horizontal secantes entre sí, de 5cm de espesor en los extremos de sus voladizos de 12,80m (F. 19). Lamentablemente, el Frontón Recoletos de Madrid se desplomó debido a los daños sufridos durante los bombardeos de la Guerra Civil. La característica común a todas las obras de Eduardo Torroja fue sin duda su variada y genial innovación, no repitiendo nunca las mismas formas ni sistemas constructivos.

Fue precisamente en 1935 cuando Félix Canela terminó la carrera de Arquitectura en Madrid, habiendo tenido la oportunidad de conocer de cerca el proceso de construcción de las innovadoras estructuras laminares de hormigón armado realizadas por Eduardo Torroja en Madrid, el Hipódromo de la Zarzuela y el Frontón Recoletos.

"¡Cuántas veces no he dado gracias a la enseñanza profundamente teórica que se me impartió en la vieja Escuela de Madrid!" [20]

Desde el inicio de sus estudios en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Félix Candela se vio atraído por una singular parte de la más vanguardista arquitectura del momento, interesándose de forma especial por las posibilidades que el hormigón armado ofrecía para generar nuevas formas laminares. Durante sus últimos años de estudiante en la universidad, fue ayudante del profesor Luis Vega en la asignatura de Resistencia de Materiales, en la que se explicaba fundamentalmente la Teoría de la Elasticidad, siguiendo la clásica tradición francesa. Félix Candela reconoce esta faceta de su estancia en la universidad de Madrid, como una parte importante por lo que significó en su formación y posterior desarrollo autodidacta sobre las estructuras laminares de hormigón armado.

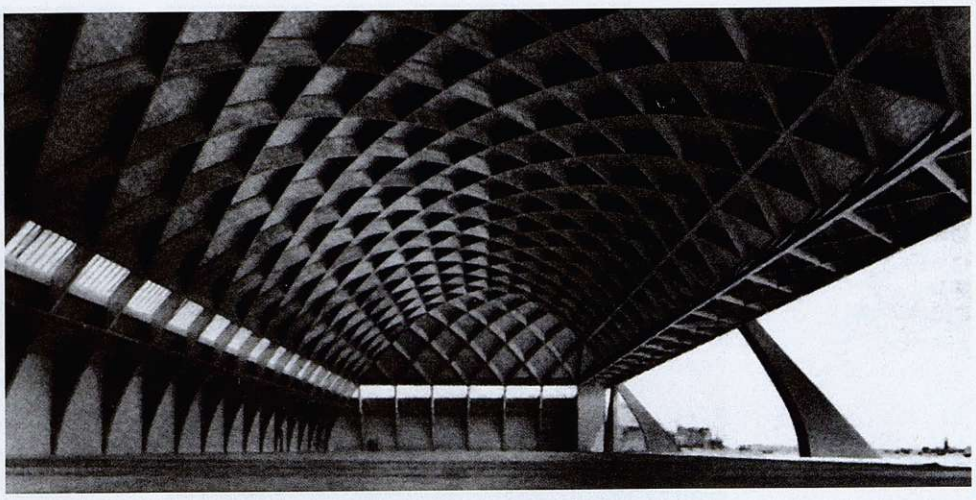
En 1935 realizó su Proyecto Fin de Carrera proponiendo una cubierta colgante bajo el título *Plaza de Toros con cubiertas colgantes y reminiscencias exteriores tradicionales*. Al año siguiente, en 1936, la Real Academia de San Fernando le concedió la beca que había solicitado para estudiar en Alemania, "Las influencias de las nuevas técnicas de hormigón armado en la plástica arquitectónica", con los ingenieros Dischinger y Finserwalder, máximos pioneros en el proyecto, cálculo y construcción de las estructuras laminares, que trabajaron durante muchos años en estrecha relación con la famosa empresa constructora alemana Dyckerhoff y Widmann, que en 1922 había construido la primera estructura laminar del mundo.

Pero Félix Candela no pudo realizar su anhelado viaje a Alemania para especializarse en las estructuras laminares bajo las enseñanzas de los, hasta entonces, más venerados maestros espe-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 20)

Hangares
Orvieto, 1935
Pier Luigi Nervi



cialistas a nivel internacional. El 18 de julio de 1936, el mismo día que tenía previsto viajar a Alemania, estalló la Guerra Civil española y Félix Candela decidió no viajar, optando por permanecer en España, colaborando con el Ejército Republicano. En 1939, tras finalizar la Guerra Civil, abandonó España e inició su viaje al exilio, llegando a México, donde se estableció ese mismo año. Una vez allí, Félix Candela, tal y como él mismo relató posteriormente, trabajó como delineante, constructor y arquitecto, colaborando con diferentes empresas y oficinas, entre ellos con el arquitecto mexicano Juan O´Gorman, Raúl Fernández Balbuena, y la empresa Vías y Obras de Jesús Martí. No fue hasta 1946 cuando pudo fundar su primera oficina profesional con su hermano Antonio, recién llegado desde España e instalado definitivamente también en México.

Retomando el panorama del contexto internacional de la década de los años 30, el ingeniero italiano Pier Luigi Nervi (1891-1979) fue otro de los más destacados protagonistas de "la Aventura Laminar". Al igual que Eduardo Torroja, había iniciado el ejercicio de su profesión en 1928, construyendo sus primeras estructuras laminares en esta misma década de los años 30 [21]. Fue el inventor del "ferrocemento" y autor de un amplio número de estructuras laminares en las que empleó sistemas mixtos de construcción utilizando piezas prefabricadas a pie de obra, recibidas generalmente sobre un entramado de nervaduras inspiradas en los esqueletos vegetales de la Naturaleza. En 1935 construyó dos hangares en Orvieto, tras haber ganado el concurso convocado por la Fuerzas Aéreas italianas (F. 20). Se trataba de unas innovadoras estructuras laminares de hormigón armado de formas geodésicas nervadas, de 50m de luz, de *gran ligereza y economía de construcción*, cuyo comportamiento estructural comprobó mediante ensayo sobre modelos. En 1939 construyó seis nuevos hangares, utilizando por primera vez piezas prefabricadas *in situ*, para obtener una mayor economía en su construcción. [22]

"No considero lícito, sin embargo, buscar esta belleza alterando la forma natural de una estructura, en aras de un escandaloso sensacionalismo, pero no hay razón económica que nos impida moldear de manera arbitraria la configuración particular de cada elemento... Hay campo más que sobrado en este tratamiento sensitivo de los detalles para expresar la propia personalidad y talento sin tener que recurrir a soluciones extravagantes que estén en desacuerdo con las inmutables Leyes de la Estática" [23]

Félix Candela no conoció personalmente a Pier Luigi Nervi, pero se declaró gran admirador no sólo de sus estructuras laminares sino también de su específica filosofía arquitectónica, que le permitía, desde el claro conocimiento del funcionamiento estructural de las formas, moldearlas dotándolas de una increíble y mágica belleza. Félix Candela siempre quiso resaltar lo absurdo que le parecía la aplicación inversa de este proceso, que muchos otros profesionales de la arquitectura estaban entonces practicando, en un frustrado intento de imitar a Nervi, sin entender previamente las inmutables Leyes de la Estática.

En estos momentos la empresa Dyckerhoff y Widmann continuaba liderando en gran medida la evolución y desarrollo de las *Thin Concrete Shells*, a través de sus innovadoras construcciones y también de su continua labor de investigación, difusión, distribución de patentes y formación técnica de nuevos ingenieros. Entre las múltiples estructuras laminares construidas en aquellos años por Dyckerhoff y Widmann se encuentran la de los Hangares para aviones Bug en Rügen (Alemania), una lámina asimétrica de cañón corrido nervada, de 60m de longitud y 40m de luz de vano, y la cubierta del Gran Mercado de Colonia (Alemania), 1937-1939.

Es también en 1930 cuando el ingeniero alemán Anton Tedesco (1903-1994) [24] entró a trabajar en la empresa Dyckerhoff y Widmann, colaborando con Franz Dischinger y Ulrich Finsterwalder. Intervino en el proyecto del Gran Mercado de Budapest (1935), así como en el

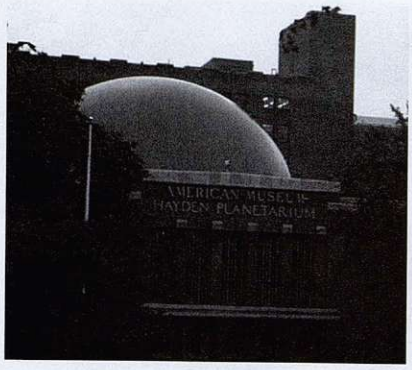
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 21)

Hayden-Planetarium
Nueva York, 1934
Anton Tedesco

(F. 22)

Planta depuradora de agua
Hibbing, 1939
Anton Tedesco





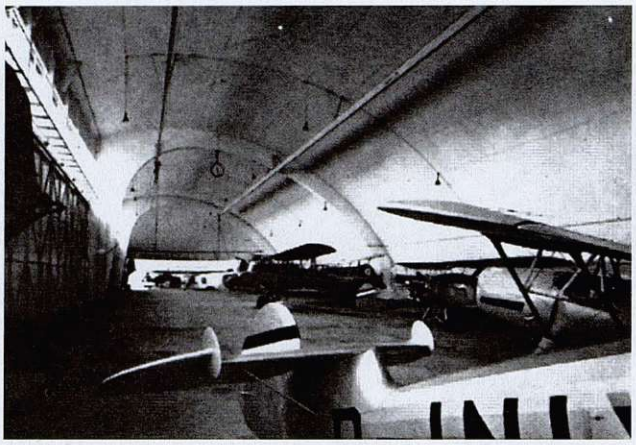
análisis y construcción de muchas estructuras laminares que posteriormente se convirtieron en obligada referencia internacional. Dos años más tarde fue enviado a Chicago con la intención de introducir en Estados Unidos la construcción laminar, colaborando con la empresa de ingeniería Roberts y Schaefer de Chicago. La primera estructura laminar que Tedesco proyectó en Estados Unidos fue la del Hayden-Planetarium de Central Park, Nueva York, en 1934, utilizando la patente del sistema Zeiss-D+W, pero adaptándola a la construcción americana, razón por la cual no se importó el encofrado perdido colaborante formado por entramado de barras, sino que se utilizó un encofrado tradicional (F. 21). Se trataba de una lámina esférica de 25m de diámetro y 7,6cm de espesor. Lamentablemente esta lámina fue demolida en 1997.

En esta historia laminar, en la que van apareciendo diferentes formas geométricas y técnicas constructivas, es necesario entender que la alternativa de construir grandes cubiertas laminares de hormigón armado o pretensado no era el resultado de un puro capricho moderno, respondía a la más innovadora actualidad del contexto técnico-científico del momento. Tal y como todos sus más relevantes autores manifestaron a lo largo de esta historia, y concretamente Anton Tedesco a su llegada a Estados Unidos, este tipo de cubiertas únicamente se construían cuando realmente representaban una economía frente a las tradicionales soluciones metálicas, contando con la indudable ventaja de su resistencia frente al fuego [25]. Por esta razón, era necesario saber optimizar la forma resistente de la lámina, ahorrando hormigón y acero en su construcción, y también contar con el coste de su ejecución, que no en todos los países ni momentos resultaba ser el mismo, debido a la repercusión de la mano de obra, medios auxiliares disponibles y tradiciones constructivas. Por ello, las estructuras laminares tuvieron mayor repercusión en países como México que en los Estados Unidos. "Las estructuras que han dado fama a Félix Candela han podido ser creadas solamente en nuestra época, y quizás sólo en México, o en un país de condiciones sociales y clima similares. Pero no era en absoluto necesario que hubieran ocurrido. Si se construyeron, y en tal profusión y variedad, es debido a la personalidad del hombre mismo" (Ove Arup, 1963).

Los autores de las *Thin Concrete Shells* se vieron forzados a agudizar su ingenio no sólo en la búsqueda de la eficacia y esbeltez de la forma resistente sino también en busca de la optimización de los laboriosos y costosos procesos constructivos que este tipo de estructuras demandaba desde su propio replanteo en obra, los artesanales encofrados, la colocación de armaduras... Pese a estos inconvenientes, Anton Tedesco construyó en Estados Unidos más de 60 estructuras laminares, demostrando que era posible optimizar su uso, convirtiéndose en su máximo representante e introductor. Otras de las más famosas estructuras laminares construidas por Anton Tedesco en la década de los 30 fueron la del Ice Hockey Arena de Hershey (1936), una lámina nervada de cañón, que fue la de mayor luz de vano construida en aquellos momentos, con una luz entre apoyos de 70,73m y un espesor de 9cm, así como la Cúpula del Auditorio de Nueva Orleans (1939) y la Planta depuradora de agua en Hibbing, construida en 1939, con la geometría laminar de una elipsoide de rotación de gran esbeltez (F. 22).

En 1934, el ingeniero alemán Wilhelm Flügge (1904-1990) publicó el primer texto sobre la teoría de las estructuras laminares *Statik und Dynamik der Schalen*, que fue traducido al inglés en 1960 bajo el título *Stresses in Shell*, y que durante más de veinte años fue referencia obligada para las *Thin Concrete Shells* [26]. Una vez más, se trata de un ingeniero que trabajó como asociado en Dyckerhoff y Widmann.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 23)

Hangar para aviones
Alemania, 1945
Dyckerhoff y Widmann

(F. 24)

Hangar para aviones
Colonia, Alemania, 1945

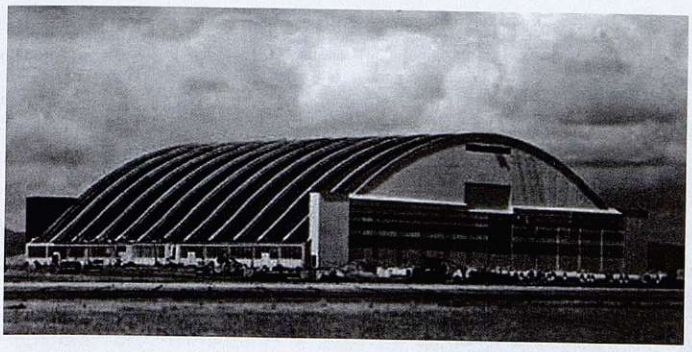
La Aventura Laminar y la Segunda Guerra Mundial (años 40)

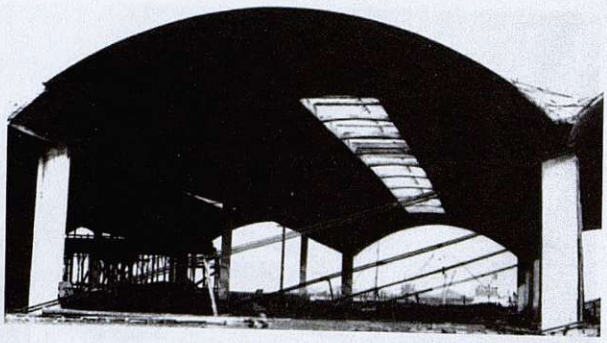
La década de los años 40 estuvo –lamentablemente– presidida por la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), y en el caso de España por la postguerra civil. La actividad bélica desarrollada potenció la necesidad de construir nuevas obras de ingeniería civil, puentes, vías de ferrocarril, aeropuertos... y encontró nuevas aplicaciones para el uso de las estructuras laminares en los edificios de apoyo de la campaña, construyéndose gran número de cuarteles, depósitos de agua y hangares para aviones (F. 23), y no sólo centros de recreo, auditorios o grandes instalaciones deportivas cubiertas. Por este motivo, se aceleraron a nivel mundial las investigaciones necesarias para poder optimizar no sólo la adecuada *forma resistente y economía de material* sino también sus procesos constructivos y sistemas de comprobación y cálculo. La inmediatez se consolidó como uno de los objetivos fundamentales. Los hangares para aviones fue uno de los tipos de edificación en el que se centró gran parte de la atención y análisis de estos años. Su demanda de uso desembocó, casi de forma generalizada, en el abandono de soluciones de geometrías cupulares, centrándose en la necesidad de proyectar grandes láminas de cañón corrido (F. 24). Pier Luigi Nervi, en base a sus propios precendentes de hangares laminares nervados, construyó otros seis hangares en Italia entre los años 1939 y 1942 utilizando por primera vez piezas prefabricadas *in situ*, para obtener una mayor economía en su construcción.

La empresa Roberts y Schaefer, con quien trabajó Anton Tedesco en Chicago, recibió gran número de encargos para construir este tipo de edificaciones durante la Segunda Guerra Mundial, y aprovechó la ocasión para realizar análisis y ensayos específicos que le permitieran optimizar el uso de estructuras laminares de hormigón de cañón corrido. En aquellos momentos todavía se recordaba el famoso colapso del hangar de Cottbus construido por Finderwalder en 1933 con el sistema Zeiss-Dywidag (Z-D), que se derrumbó durante su descimbrado. Se trataba de una lámina cilíndrica de cañón corrido sin nervaduras, de 35m de luz, 40m de longitud, 12,30m de diámetro y 9cm de espesor. Tal y como posteriormente señalaron los ingenieros Hines y Billington [27], el colapso de la estructura laminar de la Flight School Hangar construida en Cottbus (Alemania) demostró las graves consecuencias de incrementar las dimensiones de las Barrel Vault Thin Shells. Tal y como era de esperar, el cambio de escala de las primitivas macetas de Monier demandaba un riguroso conocimiento del comportamiento estructural de cada específica forma geométrica utilizada.

Este hecho desencadenó la toma de conciencia de la necesidad de realizar comprobaciones rigurosas para cada cambio en la geometría, tamaño y sistemas de apoyo del enorme abanico de tipos de estructuras laminares que fueron surgiendo paulatinamente. Por otra parte, hizo también surgir, como reguero de pólvora, un sinfín de nervaduras transversales de rigidización en las láminas de cañón corrido, seguramente muchas de ellas sin razón de ser. Una historia que me recuerda, de alguna manera, la prolífica aparición de dobles arbotantes en todas las catedrales góticas que se estaban construyendo en Europa, con independencia de su mayor o menor altura, cuando una parte de la nave de Notre-Dame de París colapsó debido al incremento de su altura respecto a la máxima alcanzada hasta aquel momento. El cambio de tamaño de la catedral, manteniendo su mismo tipo de esqueleto pétreo, provocó su colapso por el simple hecho de que su mayor altura hizo intervenir una nueva fuerza sobre la catedral, el empuje del

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 25)

Hangar en Rapid City
Dakota, 1947-48
Anton Tedesco

(F. 26)

Nave en el puerto
Amberes, Bélgica, 1948
André Paduart

viento. Fue entonces cuando Notre-Dame de París se reconstruyó utilizando dobles arbotantes para contrarrestar el empuje de sus bóvedas y cubiertas inclinadas y también el viento. [28]

Años más tarde, Félix Candela, consciente de la importancia del tamaño, publica su primer artículo en el año 1950, bajo el título "Cubierta prismática de hormigón armado en la ciudad de México", en el cual hace especial hincapié en la importancia de la escala en el comportamiento estructural.

Por esta razón, durante la Segunda Guerra Mundial, la necesidad de utilización de esta geometría específica en hangares para la aviación desembocó en nuevos análisis para grandes luces y longitudes. En 1942, Robert Zaborowski realizó un ensayo en Dayton en el que se puso de manifiesto nuevamente la necesidad de rigidización transversal. Durante la década de los años 40 proliferaron estos estudios, que desembocaron en la utilización de cañones laminares reforzados transversalmente con nervaduras en arco, un tipo laminar adjudicado históricamente a la adecuación estructural demandada por los grandes hangares construidos fundamentalmente en Estados Unidos. Anton Tedesco analizó en cada caso la demanda de rigidez de la lámina proyectada, realizando minuciosos ensayos sobre modelos. Por encargo de la American Airforces proyectó gran número de este tipo de pioneros hangares en diferentes ciudades de Estados Unidos: San Diego (1941), Rapid City (1947) (F. 25), Limestone (1948), Middletown (1959).

En 1944, el ingeniero belga André Paduart (1914-1985) fue nombrado director de la compañía de ingeniería SETRA (Société d´Études et de Travaux), que introdujo en Bélgica los nuevos avances alcanzados en el uso del hormigón armado y pretensado, y su aplicación a las estructuras laminares. En 1948 construyó una innovadora estructura laminar de grandes dimensiones en el Puerto de Amberes (F. 26) [29] Se trataba de una superficie de 465m de largo y 60,60m de ancho, formada por 31 módulos cubiertos por láminas de cañón cilíndrico de 15m de luz de vano y 3m de altura, ejecutados con 8cm de espesor en clave y 12cm en arranques. La innovación consistía fundamentalmente en la inexistencia no sólo de vigas de borde y nervaduras sino de juntas de dilatación entre los 31 módulos que cubrían la superfcie total. Al igual que las catedrales góticas construidas con sus naves a la misma altura, como Santa María del Mar en Barcelona, André Paduart contrarrestó los empujes resultantes de sus láminas al ejecutarlas unas contra otras a la misma altura. El proceso de construcción diseñado estaba basado en la ejecución sucesiva de dichas láminas, utilizando el mismo encofrado y apuntalando los bordes laminares mientras se construía la lámina contigua.

En esta década se desarrollan también otros muchos tipos estructurales de cubiertas laminares. En 1946, Bernard Lafaille [30] patentó un módulo prefabricado de hormigón armado en forma de "V" para pilares, que utilizó por primera vez, en la construcción de la rotonda de la SNCF en Aviñón (Francia), unos hangares para trenes. Se trataba de una cubierta laminar de planta circular de 126m de diámetro y 15m de altura. El arquitecto fue Paul Peirani y en la obra colaboró también el ingeniero Roger Vallete. Este mismo año entró a trabajar con Bernard Lafaille el arquitecto francés René Sager (1917-1988), quien participaría desde entonces en todos los proyectos junto a Lafaille.

Félix Candela se incorpora a la Aventura Laminar (1949)

En 1949, Félix Candela, imitando a los innovadores maestros de la historia de la Arquitectura, se había ya convencido, de forma clara y rotunda, de que el camino más adecuado para capa-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

"Algunas veces me permito imaginar que el progreso de la técnica estructural se hubiera producido por la evolución natural de los métodos intuitivos y experimentales empleados con tan sorprendente éxito en la Edad Media y el Renacimiento"

citarse en el diseño y construcción de cascarones de hormigón armado no necesitaba apoyarse en los entonces farragosos y complejos sistemas analíticos matemáticos, sino que. conociendo las inmutables leyes de la Naturaleza (Estática, Mecánica y Resistencia de Materiales), el camino era la experimentación directa mediante la construcción de modelos. Consideró, además, que lo más sencillo e inmediato para él –tenía prisa por aprender– era construir modelos a escala natural, tal y como hicieron los maestros de obras medievales, que, siguiendo este mismo camino de aprendizaje, se capacitaron para crear las catedrales góticas, dotándolas de las más innovadoras bóvedas pétreas. Félix Candela, desde la audacia de la madurez de su conocimiento, trazó de esta manera el camino de su auto-aprendizaje.

Por otra parte, la experimentación con modelos a escala natural, le evitaba tener que sumergirse en otro complejo campo del conocimiento; el uso de modelos reducidos, que Eduardo Torroja estaba desarrollando magistralmente, desde los años treinta, y que lógicamente conllevaba la necesidad no sólo de contar con los medios y tecnología adecuada sino también de saber como construir y poner en carga el modelo, para poder trasladar los resultados obtenidos a la obra de tamaño natural. En definitiva, con la experimentación de modelos a tamaño natural, Félix Candela optimizó su tiempo de auto-aprendizaje, y evitó inmiscuirse en uno de los mayores problemas de esta historia, el cambio de escala, cuyo olvido a lo largo de esta "Aventura Laminar", ya había generado el colapso de algunas *Thin Concrete Shells*, antes de que Félix Candela apareciera en escena.

Siguiendo este camino hacia el conocimiento creador, que el mismo se había marcado, Félix Candela construyó en 1949, con su hermano Antonio, su primer cascarón experimental. Fue la llamada Bóveda Ctesiphon de San Bartolo de Naucalpan, en México. Se trataba de un cascarón de carácter experimental, cuya geometría respondía a la de un cañón funicular con directriz catenaria. Tal y como reseñó Colin Faber [31], este tipo de cascarón estaba basado en algunos de los prototipos realizados en Inglaterra durante la Segunda Guerra Mundial utilizando la patente genérica que Kurt Billig había desarrollado en 1943, y que teóricamente era aplicable también a otras diferentes geometrías y tamaños. Se construyó sobre 12 arcos de madera de sección parabólica, entre los que se tendió una tela de saco de yute, a modo de encofrado perdido, que al recibir el peso del hormigón adoptaba la natural flecha catenaria. De esta forma, una vez endurecido el hormigón sobre la tela de saco, el cañón resultaba formado por una secuencia continua de ondulaciones catenarias que dotaban al cascarón de suficiente rigidez, pese a su escaso espesor y ausencia de refuerzos. Félix Candela eligió esta específica geometría y sistema constructivo, por tratarse de la, aparentemente sencilla, construcción de un cascarón o membrana, es decir, de una lámina perfecta, entendida como aquella en la que siendo de doble curvatura no produce flexiones, estando el trabajo estructural totalmente identificado con su propia forma geométrica espacial.

"El arte de la creación no será nunca el resultado inmediato de una investigación analítica"

Félix Candela era también consciente y conocedor de que en esta aventura de las *Thin Concrete Shells*, a la que se empezaba a incorporar, tenía como meta la creación de nuevas formas resistentes, que debían ser lo más eficaces y esbeltas que pudieran construirse, optimizando las características específicas del material –el hormigón armado–. De la observación de las características de su primera lámina experimental se deduce nuevamente que no estaba dispuesto a perder tiempo en su auto-aprendizaje, y que decidió conscientemente que la forma geométrica que debía experimentar en primer lugar, debía cumplir el requisito de ser de doble curvatura y gran esbeltez. Sin duda, desde el principio, trazó su camino de aprendizaje de la forma más directa, imponiéndose, tal y como señaló Billington, "la disciplina de la delgadez". [32]

Con la construcción de este cascarón experimental, Félix Candela iniciaba la más gratificante y apasionante etapa de su vida profesional, tal y como él mismo la definió en las innumerables ocasiones en las que fue invitado internacionalmente por universidades, asociaciones y centros para explicar el camino andado hasta alcanzar su increíble éxito profesional. Cuando le preguntaban que cómo se consideraba a sí mismo, si arquitecto, ingeniero o constructor, solía contestar: "Soy un contratista que trabaja en algo que realmente le gusta, lo cual es una situación muy afortunada".

Llegados a este punto de la historia, aparece en la mente de todos esta obligada pregunta: ¿se arrepintió Félix Candela de no haber ido a Alemania en 1936? No, no sólo no se arrepintió sino que años más tarde explicó las razones por las cuales se había convencido de que ese viaje no le hubiera ayudado para hacer realidad su sueño, capacitarse para crear y construir cascarones de

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 26)

Hangar para aviones
Marignane, 1950-1952
Auguste Perret y Nicolas Esquillan



"Los cascarones me parecieron un reto interesantísimo y soñaba con la posibilidad de construir algunos en el futuro. Pero mi falta de experiencia y la fe juvenil en la impresionante sabiduría desplegada en las revistas técnicas me hicieron creer que la clave de la construcción de cascarones residía en complicados cálculos matemáticos, que traté –sin mucho éxito– de comprender y dominar. No fui el único despistado y desalentado por aquella sagaz barrera matemática que dio a sus divulgadores la exclusiva, por más de veinte años, en la construcción de bóvedas cilíndricas, impidiendo durante el mismo tiempo, el desarrollo y empleo habitual de tales estructuras.
Pero era tal mi entusiasmo por las soluciones matemáticas del problema que me las arreglé para conseguir una beca para trasladarme a Alemania, esperando aprender algo más de los sabios profesores que allí enseñaban. El inicio de la Guerra Civil española me salvó de tal experiencia, proporcionándome, en cambio, otras mucho más valiosas desde el punto de vista humano" [33]

hormigón armado. En efecto, explicó cómo, a mediados de la década de los años 40, una vez retomada la calma de los avatares de su vida en el exilio, recuperó su desmedido interés por capacitarse para poder llegar a construir cascarones de hormigón armado. Por ello, retomó su juvenil afición por la analítica lectura de todo cuanto se publicaba sobre este tema. Fue entonces cuando se dio cuenta de que la clave para llegar a capacitarse en esta habilidad no estaba, como pensaba en su juventud, en comprender y aprender los complicados cálculos matemáticos en los que ya se habían gastado innumerables y farragosos chorros de tinta. Félix Candela se alegró enormemente de no haber viajado a Alemania. Había descubierto que la clave residía en los sabios consejos y forma de proceder que los maestros ya consagrados, como Maillart, Torroja o Nervi, habían plasmado en sus escritos hablando sobre el "diseño estructural".

Buscando otros enfoques analíticos diferentes, Félix Candela accedió también a escritos de Van den Broek, Johansen, Freudenthal, Kist, Saliger... siguiendo la pista de todos aquellos que mostraban la existencia de otros métodos de enfrentarse al análisis estructural. Métodos basados en la Teoría de Ruptura, desarrollados en base a las características reales de los materiales y a la estática, materias que él ya dominaba desde su juventud, a través de su sólida formación en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Siguiendo este nuevo camino, Félix Candela se auto-dotó de los conocimientos necesarios para poder construir cascarones de hormigón armado, encontrando también nuevos y más sencillos métodos de comprobación y cálculo matemático.

En 1950, un año después de la exitosa construcción de su primer cascarón experimental, Félix Candela fundó, junto a sus hermanos Antonio y Julia, y a los hermanos Fernández, la empresa –Cubiertas Ala–, cuya finalidad era construir exclusivamente estructuras laminares.

Los años 50

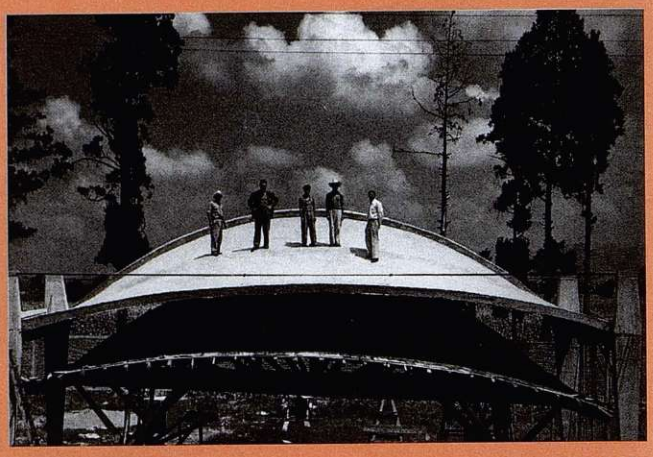
La década de los años 50, momento en el cual Félix Candela se incorpora definitivamente a "la Aventura Laminar", fue sin duda la de mayor desarrollo de las *Thin Concrete Shells* a nivel internacional. Tras tres décadas de investigación sobre el hormigón armado y pretensado, en las que se conquistaron paulatinamente nuevas formas resistentes y técnicas constructivas, perfilándose y simplificándose también los métodos de cálculo y comprobación, esta década representó el máximo apogeo de las estructuras laminares, surgiendo gran parte de los más venerados hitos de la arquitectura laminar de la Modernidad. Al final de estos prolíficos años, en 1959, se fundó en Madrid (España), en el seno del Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento, aunque ligada al Laboratorio Central, la Internacional Association for Shell Structures IASS, bajo la presidencia de Eduardo Torroja, con la finalidad de poder ordenar, debatir, reglar y difundir todos los conocimientos alcanzados, así como la evolución y destino internacional de este específico campo de la construcción civil y arquitectónica.

En los años 50 existía un gran número de pioneros y consagrados ingenieros y arquitectos que centraron su interés en el proyecto y construcción de nuevos tipos de estructuras laminares de hormigón armado y pretensado, en una continua y frenética búsqueda de nuevas, libres, esbel-

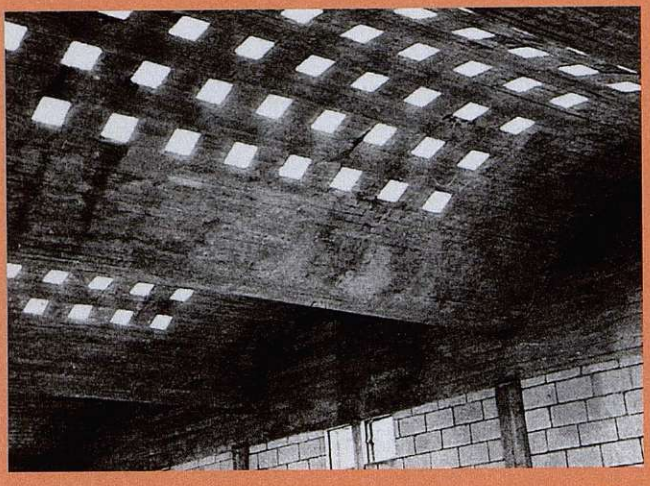
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 28)



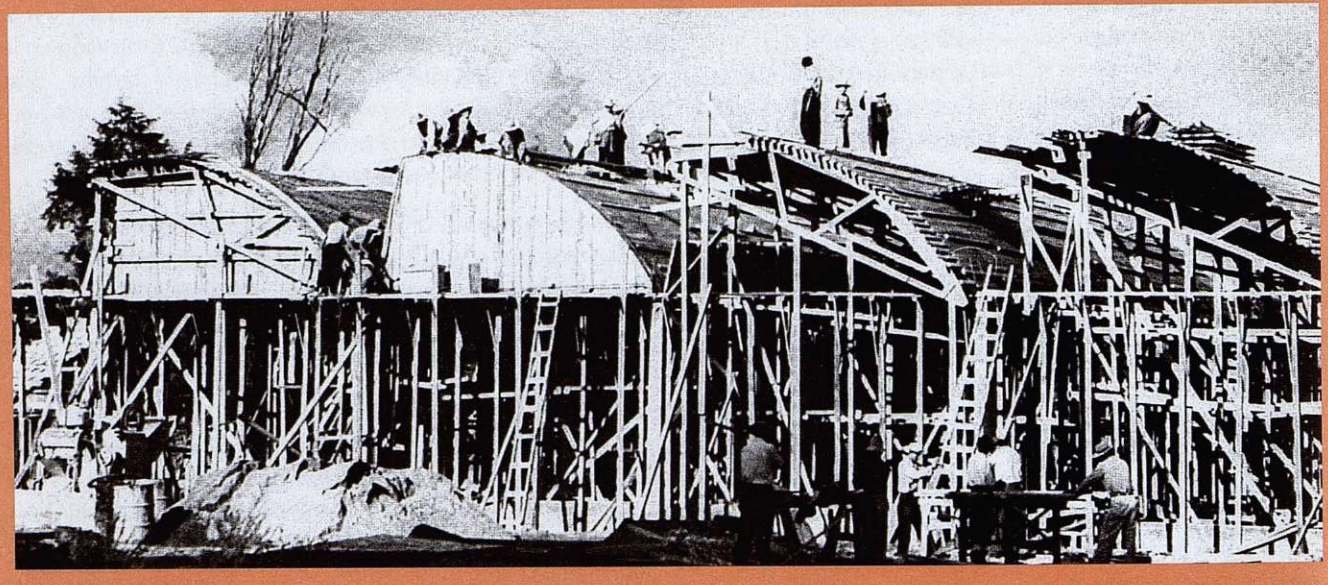
(F. 29)



(F. 30)



(F. 31)



(F. 32)

(F. 28)

Cascarón experimental Bóveda Ctesiphon,
San Bartolo de Naucalpan, México, 1949

(F. 29)

Lámina experimental conoide
Fábrica Fernández, San Bartolo, México, 1950

(F. 30)

Almacenes Bacardí, Cuautitlán, México, 1952

(F. 31)

Almacenes Aduana, México D.F., 1953

(F. 32)

Laboratorios Farmacéuticos Ciba,
Calzada de Tlalpam, México D.F.

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

tas y eficaces "formas laminares", en un momento en el que estaban todavía por llegar las adecuadas normas y sistemas constructivos de apoyo técnico para su desarrollo. Por ello, la construcción laminar tenía mucho aún de gran aventura, que requería del ingenio y valentía responsable de sus autores. Entre los más relevantes protagonistas de esta década destacan las diferentes aportaciones realizadas por los ya consagrados: Ulrich Finsterwalder, Franz Dischinger, Leonhard Obemermeyer, Auguste Perret, Nicolas Esquillan, Simon Boussiron, Eduardo Torroja, Erich Schelling, Pier Luigi Nervi, Mario Salvadori, Eero Saarinen, André Paduart, Matthew Nowitzki, Fred N. Severud, Anton Tedesco, Réne Sager, David Jawerth, Arendt M. Haas, Le Corbusier... así como las de otros ingenieros y arquitectos que iniciaron su trabajo profesional en esta misma década y que, sin embargo, se convirtieron en poco tiempo en relevantes representantes de la evolución y desarrollo de las estructuras laminares. Entre ellos destacan de forma muy especial Félix Candela y el ingeniero suizo Heinz Hossdorf.

Esta década se inició con la construcción de los famosos hangares para aviones proyectados por Auguste Perret y Nicolas Esquillan en Marignane (Francia), que fueron construidos por la empresa de Simon Bousiron (F. 27). Una cubierta laminar ondulada –corrugada– de doble curvatura y de 114m de luz de vano (récord del momento), en la que se utilizó un nuevo sistema de elevación de las láminas ejecutadas en el suelo y levantadas posteriormente a su posición definitiva. Mientras los ya consagrados maestros del arte laminar, continúan conquistando nuevos récords de luz de vano y esbeltez, e ingeniándoselas para desarrollar nuevos sistemas constructivos, Félix Candela, recién incorporado a "la Aventura Laminar", continúa desarrollando su primera fase experimental, construyendo estructuras laminares de diferentes formas geométricas, utilizando diferentes sistemas constructivos, tipos de encofrados... en un continuo afán por desentrañar todos y cada uno de los aspectos que necesita conocer para convertirse en creador de nuevas formas y especialista en la construcción de cascarones.

En la primavera de 1950 construyó la Fábrica Fernández en San Bartolo, en México. Se trataba de una lámina experimental, esta vez de forma geométrica conoidal, desarrollada sobre una planta rectangular de 15x6m, construida con un espesor continuo de tan sólo 3cm, atirantada por encima de su extradós. Esta lámina experimental le sirvió a Félix Candela para aprender, entre otros aspectos, los problemas derivados de los sistemas de descimbrado. En este caso, había utilizado una mezcla de hormigón muy seca, con la intención de conseguir una mayor resistencia, y un encofrado de tablas de madera. Como consecuencia de las características de la mezcla, resultó una manifiesta merma en la adherencia entre el árido y el mortero de cemento, de tal forma que al retirar el encofrado, de una sola vez, mediante el habitual sistema de cajones de arena, la grava se desprendió en detrimento de la apariencia interior de la superficie de lámina. Félix Candela concluyó con esta experiencia "... que era una pérdida de tiempo tratar de descimbrar de una sola vez, y que en un cascarón largo, aunque debe tenerse cuidado al descimbrar, se puede quitar la cimbra empezando por cualquiera de sus lados o por el centro de la estructura, teniendo únicamente presente la simetría". [34]

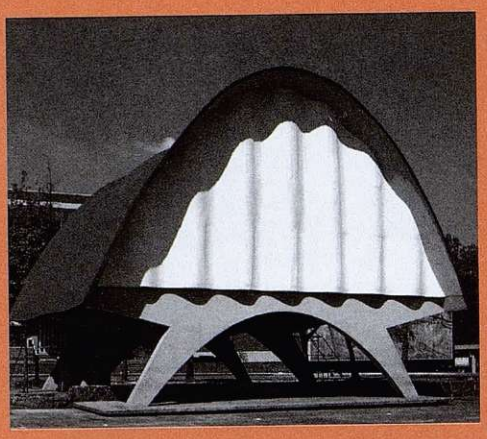
Es en este mismo año cuando Félix Candela inicia también el desarrollo y difusión de sencillos métodos de cálculo aplicados a las estructuras laminares, contribuyendo a nivel internacional a que existan alternativas de cálculo analítico más racionales y sencillas. Su primer artículo lo publicó, este mismo año, bajo el título "Cubierta prismática de hormigón armado en la ciudad de México", en el que resalta la relevante importancia de la escala. Fue precisamente una revista española, *Revista Nacional de Arquitectura*, la que publicó este artículo en su nº 99. Al año siguiente, en 1951, Félix Candela publicó en el Journal del ACI su segundo artículo, cuyo título fue "Simple Concrete Shells Structures", así como un libro, posterior, que, bajo el título de *Hacia una nueva filosofía de las estructuras*, pone de manifiesto, tal y como explica José Calavera Ruiz [35], no sólo el conocimiento que Félix Candela tenía sobre el cálculo y diseño estructural sino como fue capaz de contribuir a que se realizaran importantes cambios.

Otro de sus primordiales objetivos era optimizar el proceso de construcción de sus cascarones para "hacer rentables estas construcciones laminares" en el específico lugar donde pensaba construirlas. Para ello, contaba con la entonces mano de obra barata de México, pero tenía que optimizar el tiempo de ejecución y el coste de todo el proceso: proyecto, cálculo y construcción. Por esta razón necesitaba encontrar formas geométricas que no sólo fueran las más eficaces y esbeltas, y más sencillas de calcular, sino también las más fáciles de replantear en obra, de construir y descimbrar. Siguiendo con esta búsqueda, durante los primeros años construyó varios cascarones de formas geométricas cilíndricas, cortas y largas, utilizando diferentes tamaños de

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



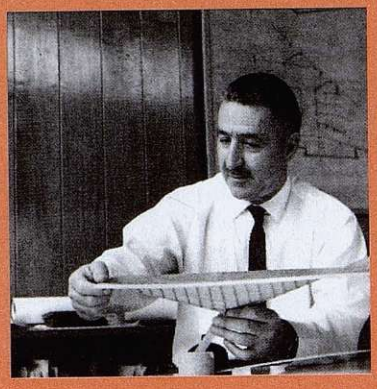
(F. 33)



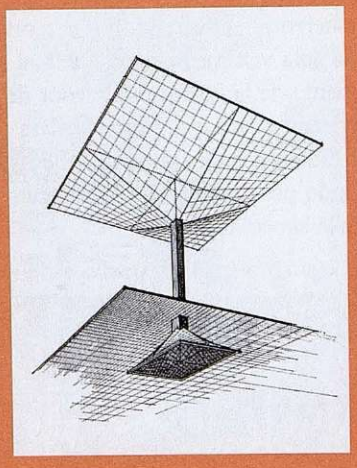
(F. 34)



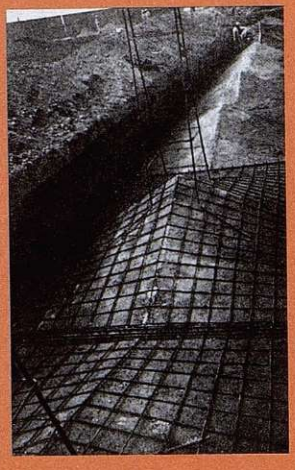
(F. 37)



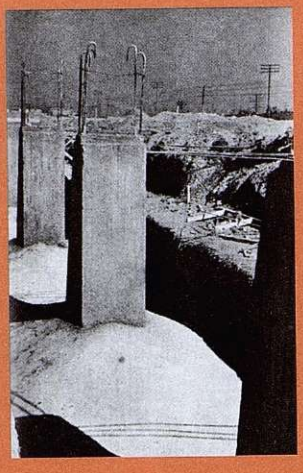
(F. 38)



(F. 39)



(F. 40 a)



(F. 40 b)

(F. 33, 34)

Laboratorio de Rayos Cósmicos,
Universidad Nacional Autónoma de México, 1951

(F. 38)

Félix Candela

(F. 40 a, b)

Membranas de cimentación,
Almacenes de la Aduana, México, 1953

(F. 37)

Paraguas experimental,
Almacenes de la Aduana, México, 1953

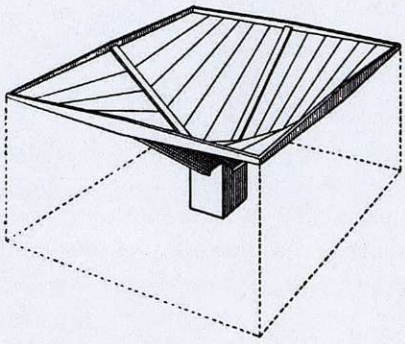
(F. 39)

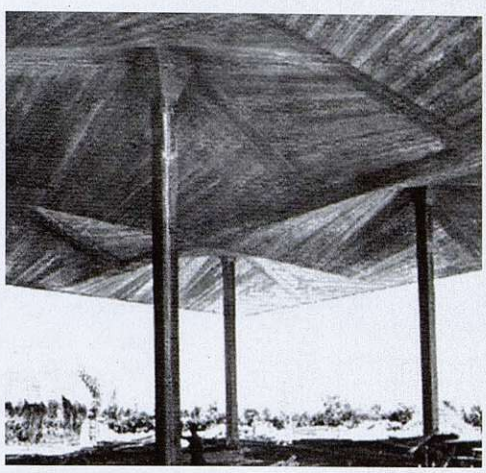
Esquema de paraguas

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

(F. 35)
Esquema de F. Aimond, 1936

(F. 36)
Entrepôt Ferrare, 1938
Giorgio Baroni





cañones, formas de contrarresto, etc., que aunque no los estimó como experimentales, está claro que la variación de diferentes aspectos sobre una misma forma geométrica genérica, le aportó nuevos conocimientos para poder discernir sobre sus ventajas e inconvenientes. Pero no sólo estas obras sino la mayor parte de las que construyó fueron en realidad un conjunto de ensayos sobre modelos a escala natural, que le permitieron convertirse en uno de sus máximos especialistas. La rentabilidad alcanzada, le permitió convertirse en el autor del mayor número de estructuras laminares jamás construido.

Algunas de las láminas cilíndricas, cortas y largas, que construyó entre los años 1951 y 1953 fueron: la Fábrica Pinedo Deportes (1951), las Bodegas Pisa (1951), los accesos cubiertos de las casas nº 4 y nº 2 de los Jardines del Pedregal en México D.F. (1951), el Salón Deportivo para el Junior Club en la Colina Escandón en México D.F., los Almacenes Bacardí en Cuautitlán, los Laboratorios farmacéuticos Ciba en la Calzada de Tlalpam en México (1953), los Almacenes de la Aduana de México D.F. (1953) (F. 31), y la Planta Fundidora Alcoa en Veracruz (1953).

La Fábrica Pinedo Deportes fue de igual tamaño que la experimental de la Fábrica Fernández, el Boliches Marsella en la colonia Juárez de México, formada por un conjunto de cilindros cortos, con una luz de vano de 15m, y con tirantes colocados en su parte superior, de tal manera que los empujes de la lámina eran recibidos directamente en sus apoyos, actuando la lámina en sus arranques como una viga. Esta idea al parecer la tomó de Maillart. En cualquier caso, Félix Candela estaba siguiendo –como el mismo explicó años más tarde– las sabias explicaciones y consejos de aquellos consagrados maestros que eran objeto de su admiración (Maillart, Torroja, Nervi y Novicki), experimentando variaciones, en sus diferentes láminas, de todos y cada uno de esos detalles fundamentales que definen el diseño estructural, uno de los cuales es indudablemente el sistema de apoyo. Es muy probable que a este respecto rescatara entonces de su memoria la magistral lección dada por Eduardo Torroja, a través de la construcción del Frontón Recoletos de Madrid en 1935, una estructura laminar de cañón cilíndrico, cuya original sección "en gaviota" aportaba mayor rigidez a la lámina, optimizándose también su funcionamiento laminar debido a la posición de sus apoyos, que se ubican en los muros extremos, comportándose por ello como un viga laminar de 55m de luz y tan sólo 8cm de espesor.

Pero sin duda, el año 1951 cobró una especial importancia para Félix Candela, ya que fue cuando construyó el cascarón que le lanzó a la fama internacional, el Laboratorio de Rayos Cósmicos de la Universidad Nacional Autónoma de México, que fue su séptimo cascarón (F. 33).

El cascarón del Laboratorio de Rayos Cósmicos debía tener un espesor de tan sólo 15mm, ya que tenía que permitir la medición de neutrones (F. 34). Ante la demanda de su extrema delgadez, Félix Candela eligió una geometría de doble curvatura –el paraboloide hiperbólico– que, además de contar con mayor rigidez que una superficie de simple curvatura, era susceptible de ser fácilmente replanteado en obra, y sobre todo de ser ejecutado con un encofrado de madera de tablas rectas, por tratarse de una superficie reglada. Félix Candela resolvió la forma final del cascarón utilizando dos paraboloides hiperbólicos –*hypars*– acoplados a una parábola principal. Félix Candela había creado el cascarón de menor espesor jamás construido, dotándolo en su conjunto arquitectónico de una indudable y racional belleza. Por la disposición y forma de

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

"Ahora me doy cuenta de que por este tiempo empecé a sentirme seguro de mí mismo, y hasta a atreverme a tener opinión propia"

sus apoyos y fachada ondulada retranqueda, la cubierta laminar de hormigón armado aparece ante nuestra mirada como si se tratase de una fina tela tendida, suavemente, sobre el armazón que cobija.

Fue la primera vez que Félix Candela utilizó el paraboloide hiperbólico, una geometría que llegaría a dominar de manera magistral, creando formas laminares muy diferentes en su conjunto, y que en poco tiempo protagonizaría la mayor parte de sus obras. [36] A partir de este momento Félix Candela desarrolla una vertiginosa y prolífera actividad construyendo una gran cantidad de cascarones de hormigón armado, utilizando diferentes geometrías de simple y doble curvatura, que le sirven para seguir de alguna manera experimentando con modelos a tamaño natural. Destacan las láminas sinuosas de la Residencia Romero en los Jardines del Pedregal (1951), la Florería Ras-Martín en las Lomas de Chapultepec (1951); las láminas cilíndricas cortas de las tres casas en los Jardines del Pedregal (1951), el Almacén Madaira (1951); los conoides de la casa en los Jardines del Pedregal (1952), la Lechería Ceimsa (1952), los Laboratorios Lederle (1952); las láminas plegadas de la Agencia de Automóviles Nash (1952), la Escuela Hidalgo (1953), el Seminario Guerrero (1953) –en el que las láminas plegadas se utilizan como forjados de las cuatro plantas del edificio–, la Escuela Montes Alpes en las Lomas de Chapultepec (1953), el Supermercado Coplico en México D.F. (1957); los conos del Auditorio de Ciencias Químicas en México D.F. (1957) –en este caso actuó solo como consultor–, y las cúpulas elípticas del Centro Gallego en México D.F. (1953).

En el año 1952 construyó su primer *hypar* aislado, para la Residencia Almada en los Jardines del Pedregal, en México D.F. A partir de este momento, el denominado "paraguas" será una de las más frecuentes formas geométricas utilizadas por Candela.

El prototipo de paraguas está formado por la macla espacial de cuatro tímpanos de paraboloides hiperbólicos –*hypar*–, sostenida por un solo pilar central. Uno de los precedentes de esta forma geométrica fueron los publicados por F. Aimond en 1936 (F. 35), así como los paraguas que construyó Giorgio Baroni en Italia en la década de los años 30 (F. 36): el Hall de la Fonderie en Milán (1934), el Entrepôt des usines de Alfa-Romeo en Milán (1937), y el Entrepôt de Ferrare (1938). Pero fue Félix Candela quien optimizó la esbeltez y tamaño de esta forma laminar y además integró los nervios de borde en el mismo espesor de la lámina, generando una imagen de borde libre, que contribuía a la más ligera percepción espacial de la pieza, y fue también el único que creó una gran variedad y número de ellos de muy diferentes tamaños y usos, incluido el uso de paraguas *hypar* como cimentación.



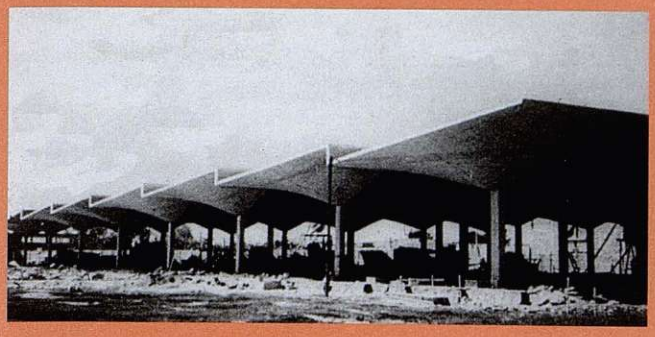
(F. 42)
Tarjeta de Navidad, Cubiertas Ala, 1965

Siguiendo el camino de la investigación previa sobre modelos a escala natural, Félix Candela construyó también paraguas experimentales. El primero de ellos lo construyó en 1952, sobre planta cuadrada de 10x10m, con un peralte de 1m y 4cm de espesor. Al parecer la flecha resultó ser escasa, y produjo deflexiones de 5cm en las esquinas, mostrando también tendencia a vibrar con el viento. Por ello, Félix Candela construyó otro nuevo paraguas experimental, esta vez en la obra de las Aduanas, levantándolo sobre planta cuadrada de menor tamaño (8x8m), con una flecha de 60cm, pero con un espesor de 8,3cm, disminuyendo así en gran medida la esbeltez de la pieza. Sin embargo, los resultados fueron los mismos, produciéndose las mismas deflexiones en las esquinas. En este caso, una vez descimbrado el paraguas, Félix Candela tenía previsto realizar una prueba de carga con sacos de arenas, pero tal y como puede verse en la conocida imagen fueron 25 operarios quienes decidieron subirse. Una imagen que recuerda la de la famosa prueba de carga realizada por Dischinger y Finsterwalder en Alemania en 1931. Con la carga de los operarios, el paraguas no incrementó su deflexión. Finalmente Félix Candela concluyó que necesitaba aumentar la flecha del paraguas para evitar la deflexión de sus esquinas. Tal y como explican Billington y Garlock, Candela optimizó la forma resistente de sus paraguas. [38]

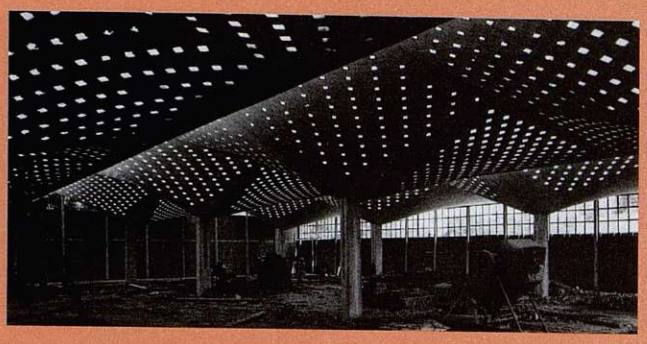
En las Aduanas de México D.F., Félix Candela utilizó también el paraguas *hypar* como cimentación, dado que este tipo de superficies están capacitadas para resistir cargas uniformemente repartidas sin que se generen flexiones. Posteriormente, utilizó este tipo de cimentación en otras estructuras laminares, como su más famoso y admirado cascarón, el restaurante Los Manantiales en Xochimilco, México, 1957-58.

En 1954 Félix Candela construye el Almacén de Río en Lindavista, México D.F., utilizando un conjunto de paraguas *hypar* para la formación de su cubierta. A partir de este momento, el paraguas se convierte en la imagen más característica de las numerosas cubiertas que construye Candela para las fábricas y almacenes. Con audacia e ingenio, Candela utiliza variables con la

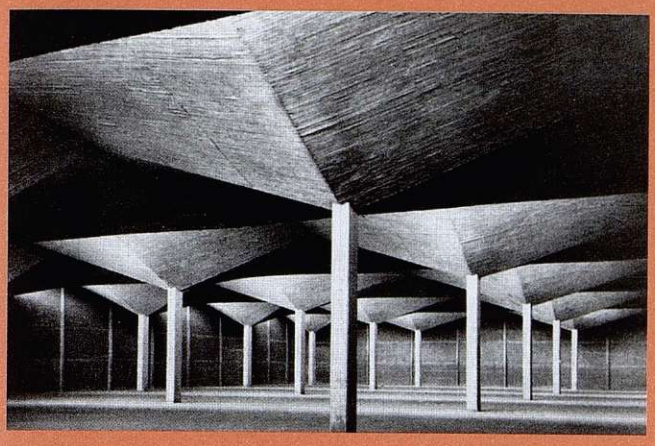
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



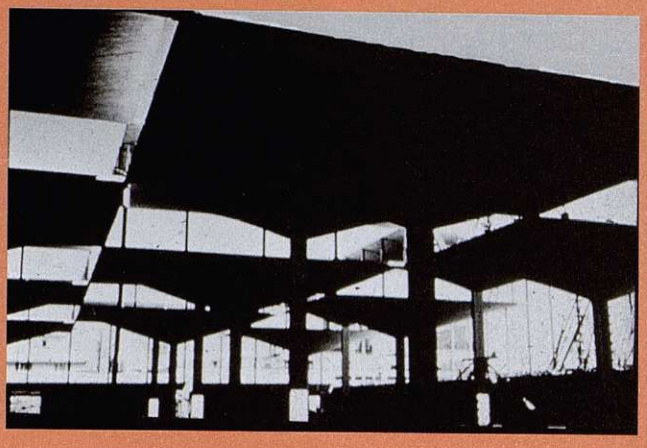
(F. 43)



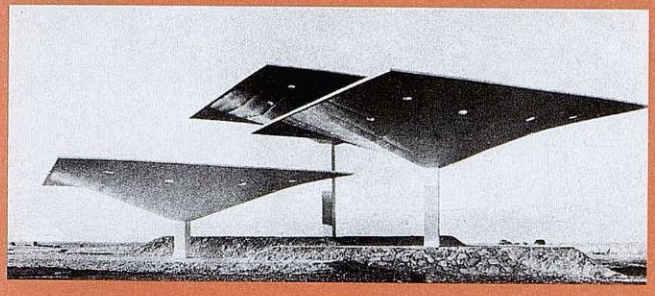
(F. 44)



(F. 45)



(F. 46)



(F. 47)



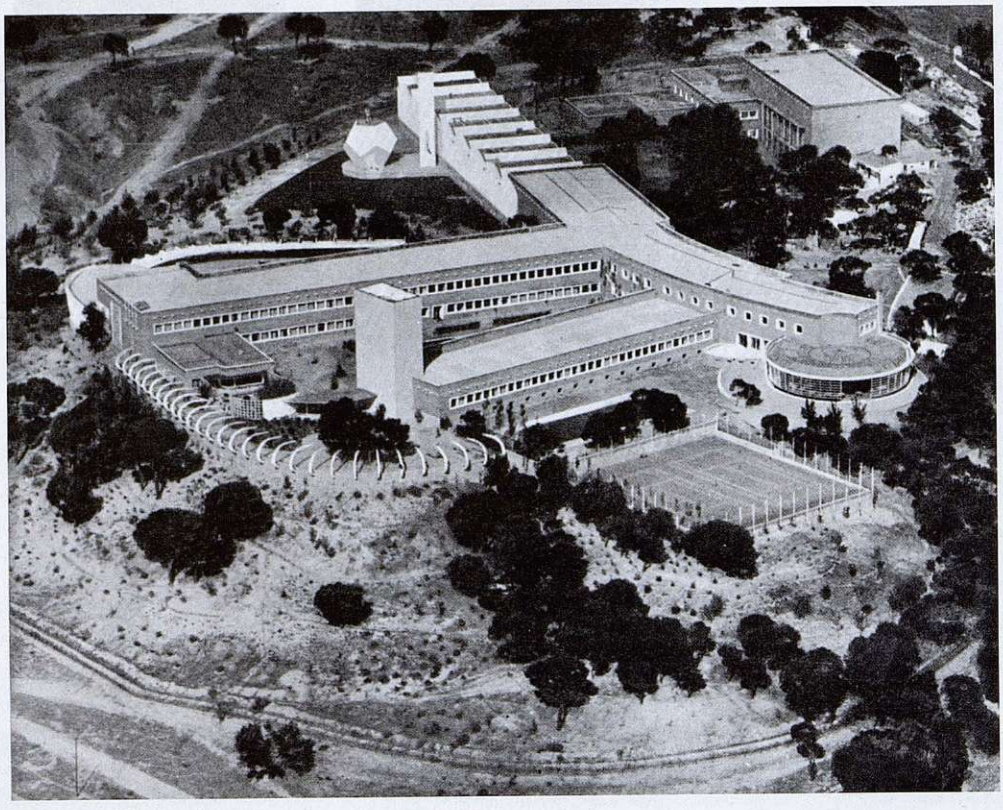
(F. 48)

(F. 43)
Almacén de Río Company, 1954
(F. 44)
Fábrica textil High Life, Coyoacán, México, 1954-55
(F. 45)
Almacén Celestino Fernández, Colonia Vallejo, México, 1955
(F. 46)
Almacenes Hernáiz, México, 1956
(F. 47)
Parque Industrial Great Southwest, Dallas (Texas), 1958
(F. 48)
Laboratorios Lederle, México, 1956

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

misma forma genérica modular, cambiando el tamaño de los *hypar* y sus inclinaciones, creando desfases en la altura de coronación entre los módulos *hypar* para permitir el paso de la luz natural, creando diferencias de nivel de altura y coronación entre ellos, tamaños, flechas, o incluyendo perforaciones cenitales en la superficie del *hypar*, como en la Fábrica High Life, Coyoacán, México D.F., 1954-55.

El paraguas y las diferentes composiciones geométricas creadas en base al paraboloide hiperbólico, formaron parte de la imagen de Cubiertas Ala, que los incorporó incluso en sus felicitaciones navideñas (F. 42).



(F. 48)

Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento ITCC, Madrid, 1953

Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento

Pero retomando la historia de "la Aventura Laminar", en el año 1953, mientras Félix Candela construye sus paraguas experimentales en México, Eduardo Torroja inaugura la nueva y moderna sede del Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento en Madrid (F. 48), un centro de investigaciones que ya había alcanzado un relevante prestigio internacional, y que desde este momento, en el cual cuenta con las instalaciones apropiadas, se convirtió en uno de los más atrayentes senos de debate técnico-científico internacional, sobre todos los temas relacionados con el desarrollo de la construcción civil y arquitectónica, y muy especialmente sobre todo lo concerniente al hormigón armado y pretensado, así como a las *Thin Concrete Shells*.

Gran parte de los más prestigiosos ingenieros y arquitectos extranjeros del momento (décadas 50 y 60), atraídos por el indiscutible protagonismo vanguardista de Eduardo Torroja en todos estos temas, así como por su especial personalidad, participaron con el Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento en alguna de las muchas actividades que organizaba de forma permanente: seminarios, jornadas, asociaciones internacionales, grupos de trabajo internacional... así como con sus publicaciones periódicas, como las revistas *Informes de la Construcción* y *Materiales de la construcción*, a través de las cuales se publican las más innovadoras obras y avances técnicos y científicos del amplio campo de la construcción. Entre la enorme cantidad de profesionales de relevante prestigio que participaron, estuvieron: Richard Neutra, Frank Lloyd Wright, Pier Luigi Nervi, Marcel Breuer, Le Corbusier, Mario Salvadori, A.M. Haas, Bernard Zehrfuss, SOM, A. Steiman, Marcel Lods, Franco Levi, Kart Terzaghi, André Mayer, M. Reimber, Hugo Barners,

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 49)
Eduardo Torroja
(F. 50)
Mario Salvadori
(F. 51)
Bernard H. Zehrfuss
(F. 52)
A. M. Haas
(F. 53)
José Antonio Torroja
(F. 54)
Félix Candela, 1969
Todos en el ITCC







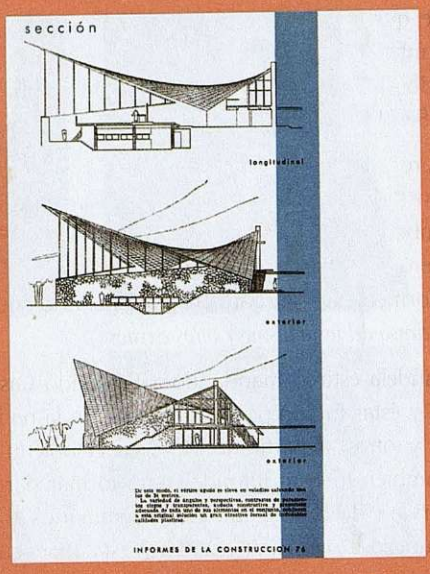

M. Dutron, M. Georges Dreax, Makoski, Lewicki, Mies van der Rohe, Pereira y Luckman, Metz, Heinz Hossdorf... (F. 49, 50, 51, 52, 53, 54)

No en vano, la revista *Informes de la Construcción* –voz impresa del Instituto–, ante su demanda internacional, publicó durante estas décadas doradas resúmenes de sus artículos en cuatro idiomas: inglés, alemán, italiano y francés, algo que ninguna otra revista técnica hizo jamás. [39]

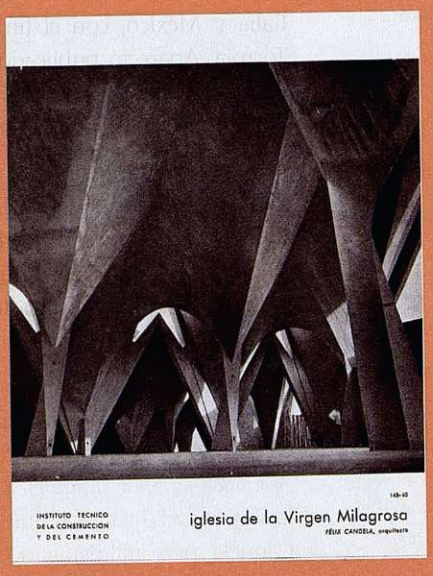
Félix Candela, desde su exilio en México, al poco tiempo de aparecer en la escena de "la Aventura Laminar", desde el inicio de los años 50, perteneció también a este extenso grupo de profesionales españoles y extranjeros que mantuvo una continua relación con el Instituto de Eduardo Torroja, con independencia de las distancias, los idiomas, las formaciones o los credos. Eduardo Torroja abrió una enorme puerta desde España al mundo exterior, generando un continuo fluir de conocimientos, reflexiones e ideas, creando una red humana unida por comunes intereses profesionales, que siempre estuvieron presididos por la vanguardia técnico-científica del mundo de la construcción civil y arquitectónica. Pero además, al igual que hiciera muchos años antes la Bauhaus, el Instituto dirigido por Torroja generó un ambiente humano en el que surgieron, fácilmente, lazos de sólida amistad que potenciaron el intercambio de ideas y experiencias a favor del desarrollo internacional de esta "Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna". Hasta tal punto que fue en el congreso celebrado en su Instituto en Madrid donde años más tarde, en 1959, se fundó la IASS Internacional Association for Shell Structures.

Félix Candela publicó algunos de sus pensamientos y obras en la revista *Informes de la Construcción* desde el año 1955, a través de Fernando Cassinello (1928-1975), que era uno de los jóvenes arquitectos que trabajaba en el Instituto de Eduardo Torroja, siendo uno de sus cometidos precisamente la dirección de dicha revista. El primer artículo de Félix Candela publicado por la revista *Informes de la Construcción* apareció bajo el título "Estructuras Laminares Parabólico-Hiperbólicas/Structural Aplications of Hyperbolic Paraboloidical Shells" en el número 76, que la revista publicó en el mes de diciembre del año 1955. Félix Candela expone las ventajas estructurales y constructivas de esta forma geométrica de doble curvatura, que le está permitiendo construir en México gran número de variadas formas como resultado de maclar, girar, inclinar, fragmentar, o invertir su posición en el espacio. Explica también el proceso de investigación que ha seguido, desde 1949, construyendo modelos a escala natural. De esta forma, la obra de Félix Candela, gracias a la publicación del artículo, se difunde desde España de forma internacional a través de una de las revistas técnicas de mayor prestigio, que había sido fundada por Eduardo Torroja en el año 1948. La publicación de este número de la revista coincidía con el anuncio del inicio del curso que había organizado Eduardo Torroja sobre *Formas resistentes de la construcción moderna*, en el Instituto ITCC. Por ello, Fernando Cassinello publica en este número de la revista obras y reflexiones de arquitectos de diferentes países: Brasil, España, Estados Unidos, Francia,

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



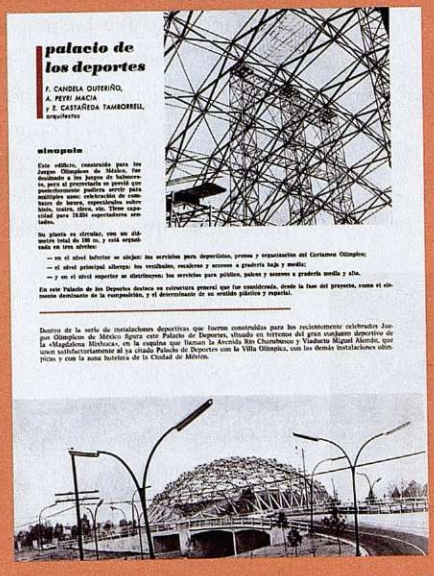
(F. 55 a)



(F. 55 b)



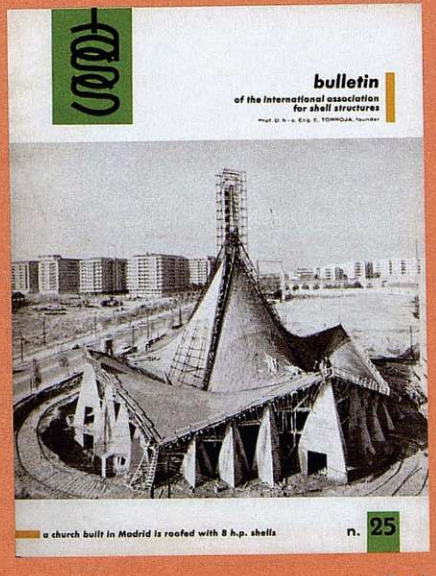
(F. 55 c)



(F. 55 d)

(F. 55 a, b, c, d)

La obra de Félix Candela en *Informes de la Construcción* ITCC



(F. 56)

(F. 56)

Bulletin IASS nº 25
Iglesia Guadalupe, Madrid 1963
Asesor: Félix Candela
Asesor Ingeniero: José Antonio Torroja
Arquitectos: E. Mora y J.R. Azpiazu

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Italia y México, con el fin de que sirva de introducción al curso organizado por Eduardo Torroja. Apareció publicado junto al artículo de Félix Candela otro de Enrique de la Mora y Palomar, que, a modo de "Credo Profesional", acompaña una de las obras que realizó con Félix Candela, la Iglesia de Nuestra Señora de la Soledad, más conocida como El Altillo (1955).

Al año siguiente, en 1956, la revista *Informes de la Construcción* publicó dos artículos de Félix Candela. En el mes de abril, en su número 80, la "Sala de Fiestas Jacaranda/Jacaranda Night-Club", y en el mes de diciembre, "La Iglesia de la Virgen de la Milagrosa/Church of the Miraculous Virgin", en su número 86. Este artículo, que como todos los de la revista, fue maquetado en el ITCC, le sirvió posteriormente a Félix Candela para incluirlo en la publicación que realizó en 1985 bajo el título *En defensa del formalismo y otros escritos.*

De forma continuada, Félix Candela estuvo mandando a Fernando Cassinello documentación sobre sus obras y experiencias, y éstas fueron publicadas, unas en la revista *Informes*, como artículos o noticias innovadoras, y otras, a partir de 1959, en el boletín de la IASS *Internacional Asociation for Shell Structures*. Y también fueron utilizadas para formar parte de exposiciones realizadas en el Instituto, que servían de base a diferentes seminarios y debates, aunque Félix Candela, personalmente, no empezó a participar en ellos hasta 1969, cuando por primera vez visitó España tras su exilio en México. Pero desde 1951, los técnicos del Instituto, enviados por Eduardo Torroja, ya habían iniciado sus continuas visitas a diferentes países y lugares, documentándose sobre las más innovadoras construcciones que se estaban realizando. Se trataba de conocer la vanguardia internacional del momento, sin dejar pasar ninguna de las innovaciones que se estuvieran realizando en cada lugar. Como parte de este especial *modelo de pensamiento y actuación*, que llevó a Eduardo Torroja a convertir su Instituto en uno de los principales centros neurálgicos del conocimiento técnico-científico de aquellas doradas décadas de la Modernidad, las experiencias y obras de Félix Candela fueron integradas en esta red de conocimiento como parte de las más destacables e innovadoras.

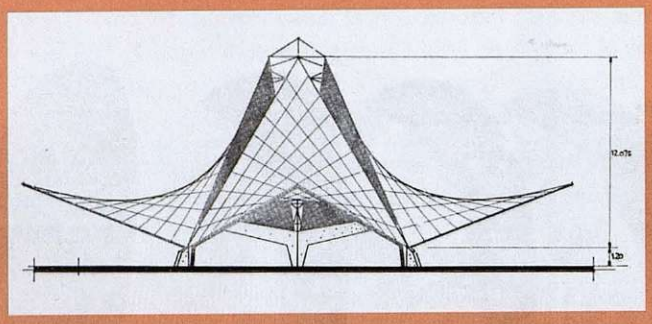


(F. 57)
Heinz Hossdorf

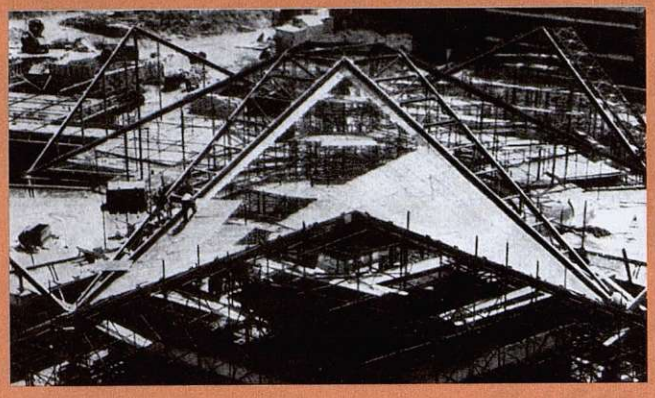
En 1953, también se incorporó a "la Aventura Laminar" el joven ingeniero alemán, formado en Suiza, Heinz Hossdorf, que al igual que Félix Candela se vería atraído por Eduardo Torroja y su Instituto, llegando a través de él a conocerse personalmente más tarde. Heinz Hossdorf (1925-2006) (F. 57) ha sido otro de los más destacados protagonistas del desarrollo de las *Thin Concrete Shells*, campo en el que realizó relevantes aportaciones no sólo a través de sus obras sino también de su propio laboratorio de análisis estructural sobre modelos físicos. Con igual personalidad autodidacta, y convencimiento de que para innovar es necesario investigar, mientras Félix Candela realizaba ensayos sobre modelos a escala natural, Heinz Hossdorf se centró en el desarrollo de modelos reducidos. Adentrándose por ello en el conocimiento de la importancia de la escala, llegando a desarrollar su propio método –"ensayos híbridos"–, que le valieron fama internacional y su consideración como sucesor de Eduardo Torroja en este campo científico. [40]

Además de revolucionar esta técnica científica, Hossdorf utilizó el ensayo sobre modelo físico reducido como Maillart, Torroja y Nervi, y Candela a tamaño natural, para poder construir libremente sus propias ideas generando nuevos tipos estructurales. Una de sus primeras e innovadoras obras fue la cubierta laminar de una nave industrial en Gossau. En 1954 los arquitectos Danzeisen y Voser solicitaron la colaboración de Hosdorff en su proyecto. Se trataba de una sucesión de láminas cilíndricas de eje inclinado que salvaban una luz de vano libre de 30 metros El problema que había que resolver era conseguir optimizar el canto resistente de dichas láminas, ya que se pretendía que la luz de norte penetrara en la nave a través del espacio vacío que quedaba entre las láminas. Hossdorf, persiguiendo la luz natural del espacio arquitectónico, utilizó por primera vez los cantos mixtos en una estructura laminar de hormigón, introduciendo cerchas metálicas conectadas a los bordes de las láminas. De esta manera, se optimizaba el funcionamiento estructural del conjunto, de una forma innovadora, y se integraban visualmente láminas, cerchas y lucernarios, colaborando entre sí en el comportamiento mecánico de conjunto. Las láminas cuentan con tan sólo 6cm de espesor con un incremento en los extremos en los que alcanza 12cm. Se realiza así por primera vez la colaboración estructural entre superficies laminares de hormigón armado y cerchas metálicas curvas. Un precedente es la cubierta laminar del Gran Mercado de Reims, construida por Eugène Freyssinet en 1928, aunque no se trate del mismo tipo de colaboración estructural, en cuanto a la optimización de su espesor se refiere. La sucesión de cañones cilíndricos de sección parabólica estaba unida por elementos metálicos, a modo de entramados de barras, que eran soporte de los lucernarios generados entre cada cañón.

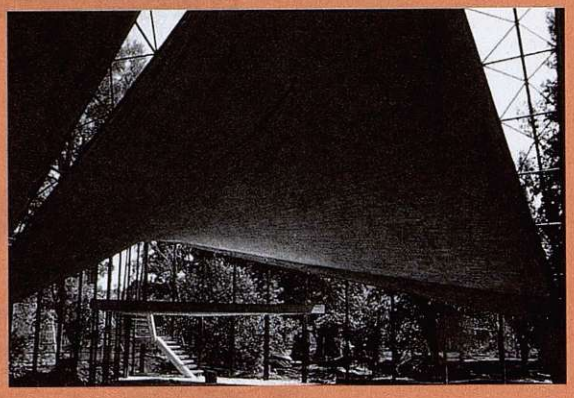
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



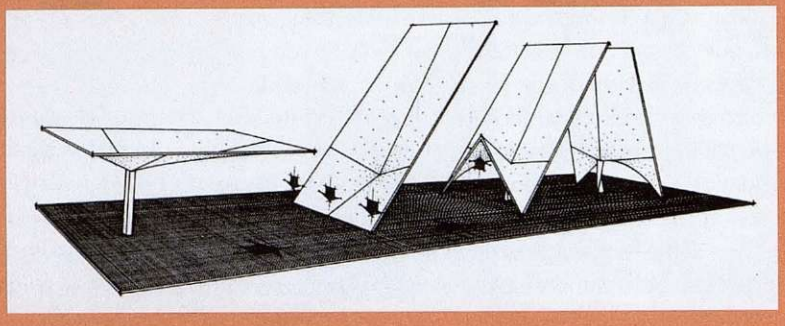
(F. 58 a)



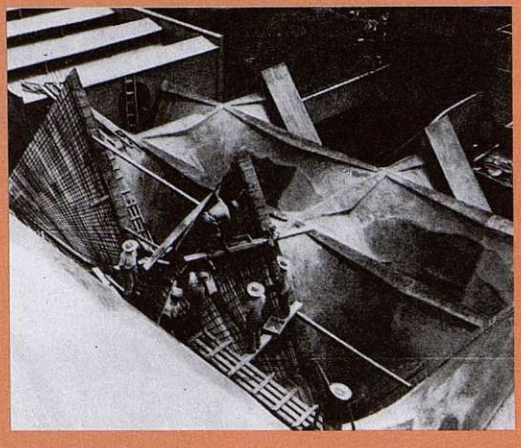
(F. 58 b)



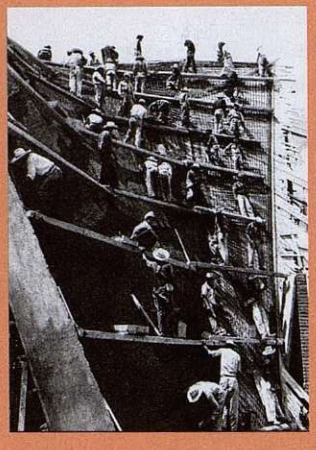
(F. 58 c)



(F. 59 a)



(F. 59 b)



(F. 59 c)



(F. 59 d)

(F. 58 a, b, c)

Iglesia de San Vicente de Paúl en Coyoacán, México, 1959

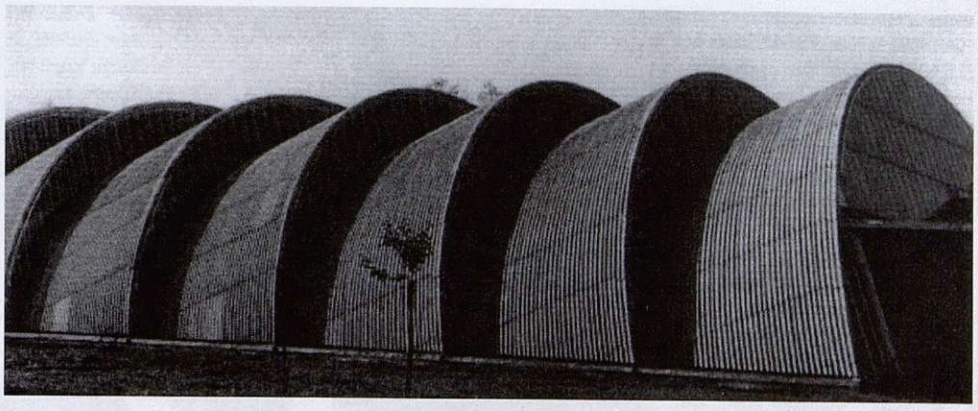
(F. 59 a, b, c, d)

Iglesia de la Medalla de la Milagrosa en Narvarte, México D.F.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 60 a)

Nave Industrial
Gossau, 1954
Ingeniero: Heinz Hossdorf



(F. 60 b)

Nave Industrial
Gossau, 1954
Ingeniero: Heinz Hossdorf



(F. 61)

Gran Mercado
Reims, 1928
Eugène Freyssinet



Félix Candela utilizó posteriormente este audaz recurso estructural con diferentes elementos metálicos y formas geométricas en algunas de sus estructuras laminares. Entre otras en la Iglesia de San Antonio de Huertas (1956), la Iglesia de San José Obrero en Monterrey (1959), la Capilla de San Vicente de Paúl en Coyoacán, México D.F. (1959) y la Iglesia de Guadalupe -conocida como de "los mexicanos"- en Madrid (1963), de la que Félix Candela fue asesor, interviniendo como arquitectos el mexicano Enrique de la Mora y el español José Ramón Aspiazu, y como ingeniero José Antonio Torroja. Esta estructura laminar fue la portada del boletín nº 25 de la IASS.

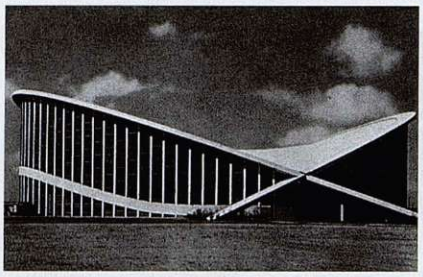
Iglesia de la Medalla de la Milagrosa

En 1953, Félix Candela construyó una de sus más famosas estructuras laminares, la Iglesia de la Medalla de la Milagrosa en Narvarte, México D.F., en la que no intervino ningún otro colaborador [41], y tuvo la oportunidad de crear en solitario una innovadora estructura laminar de la cubierta, que en esta ocasión se identifica de forma especial con el espacio interior del templo.

Su forma final está generada por un audaz discurso del dominio de la eficacia estructural de la forma, en el que Candela utiliza su ya famoso "paraguas", formado por cuatro segmentos macla-dos de paraboloide hiperbólico, esta vez *hypar* asimétrico. Este módulo de "paraguas", como si se moviera al son de una armónica partitura musical, se inclina y pliega hacia arriba la arista central del menor de sus lados hasta que sus esquinas tocan el plano horizontal. Entonces aparece otro modulo idéntico, que posicionado frente a él, y uniendo sus bordes más altos, genera un nuevo módulo formado por dos "paraguas". Y como en un solo gesto, manteniendo la continuidad espacial, los pilares adoptan la misma forma alabeada, que da continuidad a las cargas y aristas vivas, confiriendo al espacio arquitectónico una escultórica imagen interior.

También en este mismo año, 1953, es cuando se inauguró otro hito de "la Aventura Laminar Moderna", la pionera lámina ligera colgada del Arena Raleig en North California [42], desarrollada sobre una planta elíptica de 97mx92m. Esta lámina de grandes dimensiones fue proyectada por el arquitecto Matthew Nowitzki (Maciej Nowicki) (1910-1950). Debido a su fallecimiento, la construcción del State Fair Arena fue realizada por el arquitecto William Henley Dietrick en colaboración con el ingeniero Fred N. Severud. La lámina está formada por una familia de

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO







(F. 62)

State Fair Arena
Matthew Nowicki, 1953

(F. 63)

Black Forest Hall
Ulrich Finsterwalder, 1953

(F. 64)

Dulles Airport
Eero Saarinen, 1958

cables de acero en tracción, colgados de dos grandes arcos de hormigón armado, que sometidos a compresión se cruzan definiendo el perímetro elíptico de la volumetría laminar. Aunque no se trata de una lámina de hormigón armado, su construcción tuvo una enorme difusión y repercusión, incluso antes de ser construida. Prueba de ello es que, el mismo año de su inauguración, Dyckerhoff-Widmann A.G. terminaron la construcción en Karlsruhe (Alemania) de una estructura laminar colgada, ejecutada en hormigón armado y pretensada, Selva Negra (Black Forest Hall), diseñada por Ulrich Finsterwalder con la colaboración de Leonhard Obemermeyer y el arquitecto Erich Schelling. La lámina cuenta con 48,60m ancho y 73,50m de largo. En lugar de tender las familias de cables entre dos arcos de hormigón armado, como en el caso del Arena Raleig, esta lámina se apoya en un zuncho de borde ejecutado sobre pilares de hormigón armado ubicados en su perímetro. Esta lámina fue el primer resultado de adaptar la idea de Nowicki a la construcción de nuevos cascarones de hormigón armado y pretensado. Félix Candela, aunque nunca construyó cascarones colgados, que demandaban una mano de obra más especializada, admiró de manera muy especial la idea de Nowicki, que coincidía con la misma "disciplina de delgadez" que el se había impuesto en sus obras.

Las láminas colgadas fue uno de los tipos estructurales laminares que más admiración y curiosidad generó en la década de los 50. Como relevantes ejemplos de este tipo estructural, además de las ya mencionadas, cabe destacar la lámina del edificio de la Radio en Felsberg, la de las piscinas de Wuppertal, la del estadio de hielo de Jönköping en Suecia, y el Pabellón de Estados Unidos en la Exposición Internacional de Bruselas [43], que estaba formado por una familia de cables pretensados. Eero Saarinen (1910-1961), hijo del célebre arquitecto Eliel Saarinen, fue otro de los grandes protagonistas de esta década. Su mayor aportación a las láminas está referida a la enorme plasticidad, belleza y variedad de sus obras, y no a la tan criticada falta de esbeltez de algunas de sus estructuras laminares. Utilizó en sus proyectos diferentes geometrías y sistemas constructivos. Entre sus obras están: el Auditorio Kresge y la capilla en el MIT, Cambridge (1950-1955), el estadio de hockey David S. Ingalls en la Universidad de Yale, New Haven (1953-1959), la terminal de la Trans World, aeropuerto JFK, Nueva York (1956-1962), y la lámina colgada del aeropuerto internacional Dulles, Chantilly, EEUU (1958-1962).

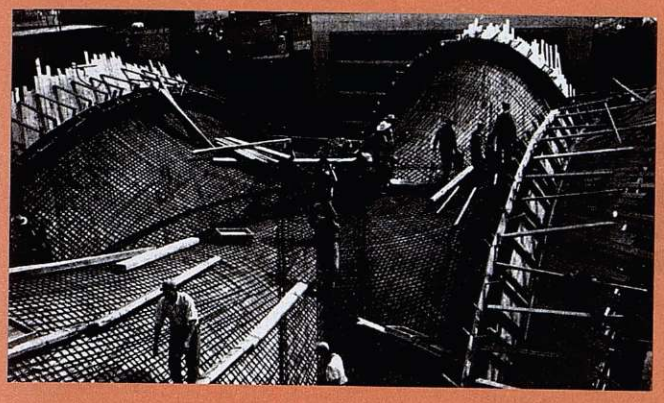
Félix Candela y el borde libre

Otra de las aportaciones de Félix Candela fue el hecho de dotar a sus cascarones no sólo de una esbeltez sobrecogedora sino de "bordes libres". Láminas de bordes libres ya habían sido construidas anteriormente, con gran maestría, entre muchos otros por Eduardo Torroja en el Hipódromo de la Zarzuela (1934) y Robert Maillart en la Exposición Nacional de Zúrich (1938). Pero Félix Candela quería buscar la manera de dotar de bordes libres a sus cascarones, proyectados en base a otras diferentes geometrías y condiciones de apoyo. Fue en las bóvedas por arista en las que Candela encontró la manera de construir sus cascarones con borde libre, creando algunas de sus más famosas obras, entre otras: la Iglesia de San Antonio de Huertas, el Club Jacaranda, la Embotelladora Bacardí y la Capilla abierta de Cuernavaca. Si bien es cierto que con anterioridad Candela ya había dotado a sus paraguas *hypar* de bordes libres. Como cada forma geométrica genera un determinado estado de estabilidad y comportamiento estructural, con unas también determinadas condiciones de apoyo, Félix Candela, en su afán de optimizar cada una de sus nuevas formas geométricas, se adentró en el análisis de cómo liberar de nervaduras de rigidez de borde a las bóvedas de crucería *hypar*.

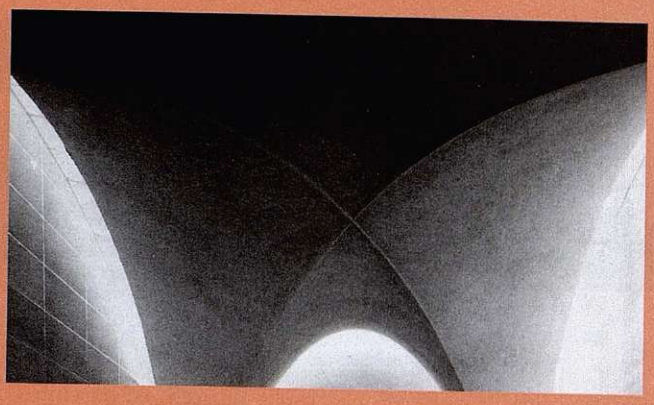
"La simplificación real de las condiciones de borde, nunca explicada claramente en la mayoría de los textos, fue finalmente clara para mí. Entonces traté, sin éxito, de igualar las fuerzas normales a las aristas, pero la planta del cascarón no era simétrica" [44]

Una vez más, apoyándonos en las explicaciones del propio Félix Candela [44], él mismo nos desvela como descubrió la manera de poder construir "bordes libres" en sus cascarones, precisamen-

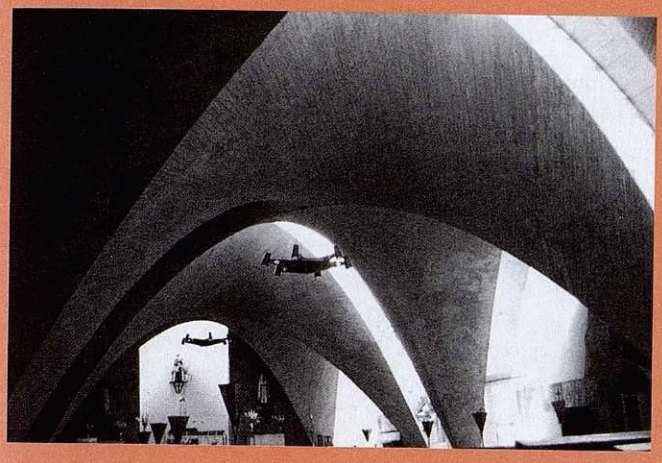
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



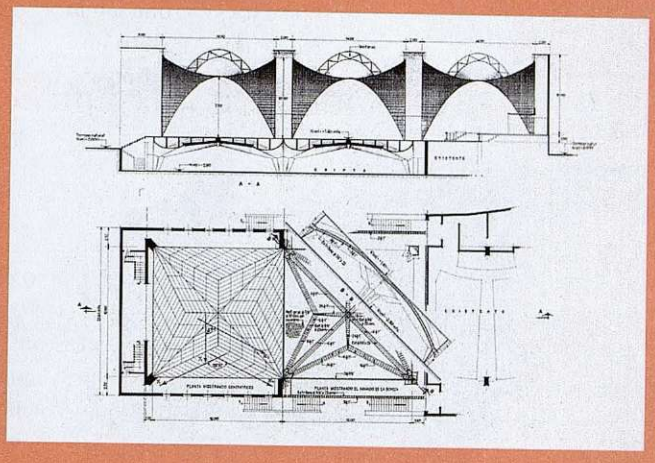
(F. 65 a)



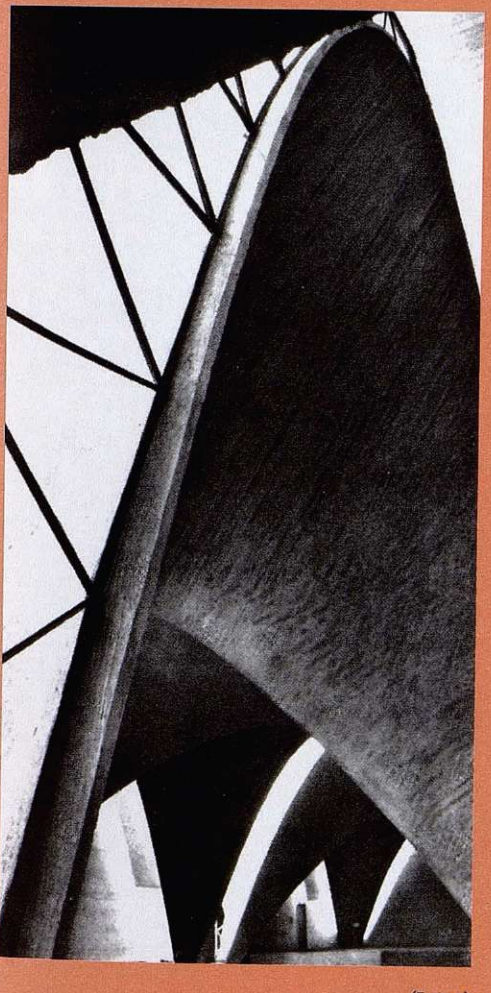
(F. 65 b)



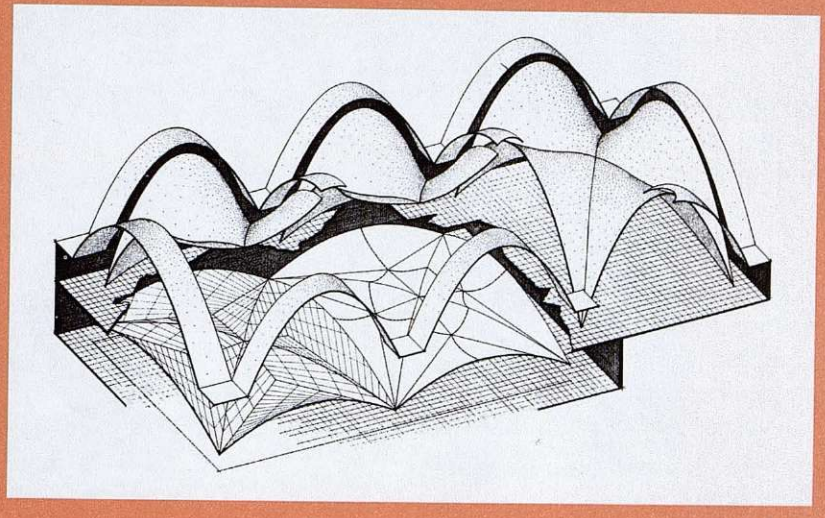
(F. 66 a)



(F. 66 b)



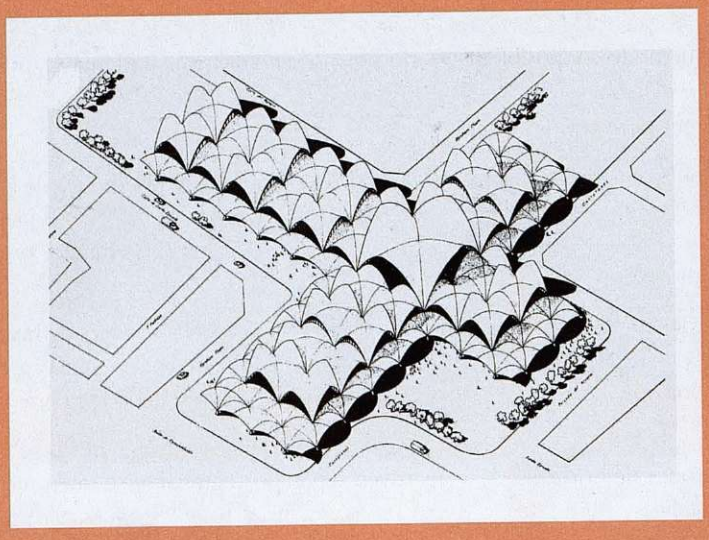
(F. 66 c)



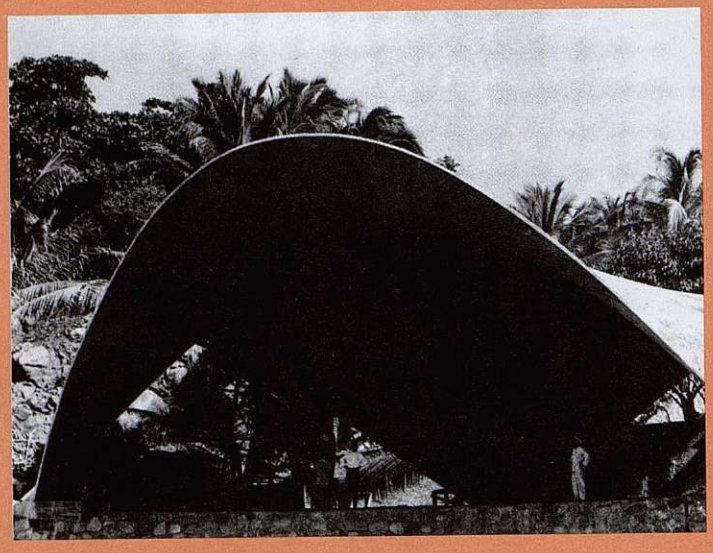
(F. 66 d)

(F. 65 a, b)
Bolsa de Valores, México D.F., 1955
(F. 66 a, b, c, d)
Iglesia de San Antonio de Huertas, Tacaba, México, 1956

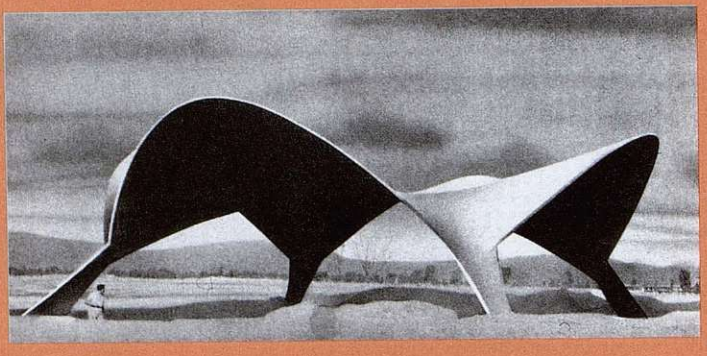
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



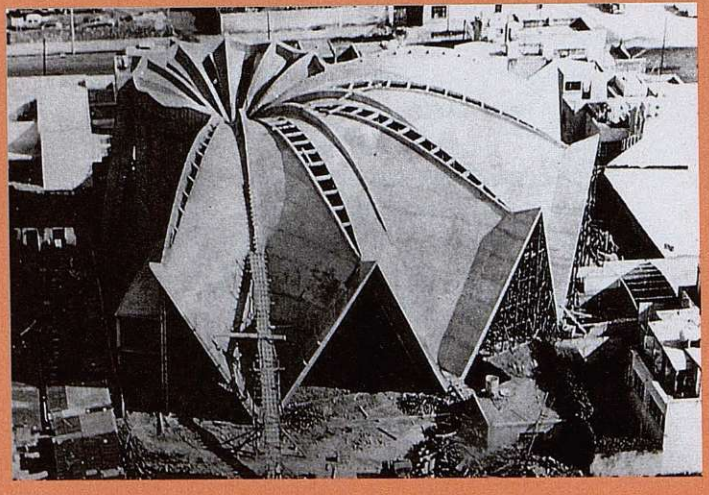
(F. 67)
Proyecto de mercado, 1956



(F. 68)
Club La Jacaranda, México, 1957



(F. 69)
Oficina de Ventas en Guadalajara, 1960



(F. 70)
Capilla de Santa Mónica, 1960

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

te durante la construcción de la cubierta laminar del edificio de la Bolsa de Valores de México D.F. (1955), en la que no le fue posible realizarlo por no ser simétrica su planta (25,50x14,10m).

Bóvedas de crucería *hypar*

Fue poco después, en 1956, en la Iglesia de San Antonio de Huertas, diseño de los arquitectos Enrique de la Mora y Fernando López Carmona, cuando dada la simetría de su planta, que estaba formada por tres cuadrados idénticos, Félix Candela se atrevió a liberar, por primera vez, sus cascarones de bóveda por arista de los nervios de rigidez de borde.

La volumetría de la iglesia está formada por el conjunto de tres cascarones de hormigón armado, cuya geometría responde a la de una bóveda de crucería de cuatro aristas generada por el cruce de paraboloides hiperbólicos con bordes en parábolas, resultado del corte vertical de las superficies.

Los tres cascarones de hormigón se construyen separados entre sí, y se unen mediante ligeras armaduras metálicas, sobre las que apoya un arco cilíndrico de hormigón armado. Las armaduras metálicas se utilizan como soporte de lucernarios vidriados, que dejan pasar la luz natural entre los cascarones de hormigón, enfatizándose así la percepción de las líneas de sus bordes libres. De esta manera Félix Candela resalta la aportación más relevante de este conjunto laminar, el primero en el que construyó bordes libres de zunchos de rigidez en este tipo de geometrías *hypar*. Espesor continuo de 4cm.

"... si queremos tener bordes libres, debemos tener algunos bordes interiores o aristas que lleguen al suelo por líneas inclinadas (en una estructura simétrica), o bien todos los bordes rígidamente fijos a elementos estructurales capaces de resistir fuerzas en cualquier dirección"

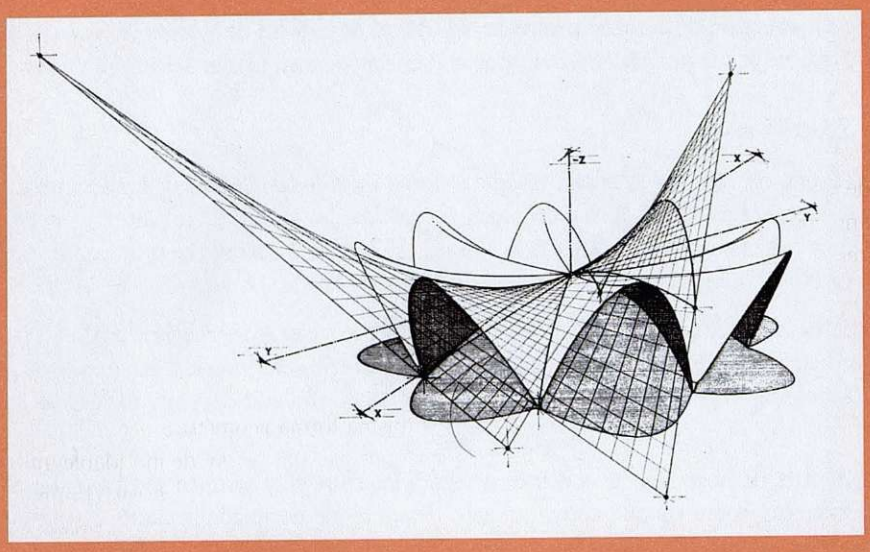
Otra de las originalidades de este proyecto es la solución que Candela utiliza en la cripta de la iglesia. Ante la necesidad de que el peralte del forjado de la cripta fuera el mínimo posible para no elevar demasiado la cota de coronación del conjunto de la iglesia, y el interés de los arquitectos para que no existieran soportes intermedios que rompieran la diafanidad de su planta, Candela proyecta unas complejas bóvedas plegadas, estrellas casi planas. Cada una de estas bóvedas está formada por la intersección de doce segmentos de *hypar*. Debido a su planeidad, así como a las fuertes cargas que estas bóvedas tenían que soportar, no era posible dejar sus bordes libres, pero tanto los zunchos de borde como las costillas que se ejecutaron en su extradós para soportar el forjado de piso de la iglesia quedaron ocultos, al estar ubicados en el espacio entre el extradós de las bóvedas y la cara inferior del forjado. Todos los pliegues de las bóvedas contienen zunchos de hormigón armado que garantizan la absorción de esfuerzos hasta los soportes exteriores, existiendo un fuerte atado en forma de cruz en su clave, resuelto con un zuncho de cuelgue, que trabaja a compresión, y que aparece visto en el intradós de cada bóveda. Su geometría en cruz se percibe como una decoración de la bóveda, quedando integrada en el espacio interior de la cripta.

Aunque se trate de un tipo estructural y constructivo totalmente diferente, Félix Candela, al igual que hicieran los maestros medievales en las catedrales góticas construidas en zonas sísmicas, con terrazas planas sobre el extradós de sus bóvedas, supo encontrar la manera de ocultar, en el espacio vacío entre la bóveda y el forjado de piso, los elementos estructurales necesarios, no sólo para garantizar el buen funcionamiento estructural del conjunto sino también para preservar la percepción arquitectónica del espacio interior del templo.

Ésta es sin duda otra de las características que aportó la obra de Félix Candela al patrimonio de la arquitectura laminar de la Modernidad; su especial modelo de pensamiento y actuación, común a todos los grandes maestros que a través de los siglos supieron capacitarse para construir sus propias ideas, pero siempre desde la conciencia de que la Arquitectura es un arte, y como tal produce sentimientos.

Este mismo año, en 1956, Félix Candela proyectó un gran mercado en el que pensaba aplicar a gran escala, y con nuevas ideas, la construcción de cascarones de borde libre. Lamentablemente este proyecto no se construyó, porque tal y como señala Colin Faber seguramente habría sido su obra más importante. La volumetría del mercado se desarrollaba sobre una planta cruciforme, en la que utilizaba módulos *hypar* simétricos de iguales geometrías pero de diferentes tamaños. La composición volumétrica del conjunto seguía, de alguna manera, la de una catedral gótica en la que las bóvedas de arista más pequeñas ocupaban las naves laterales, las intermedias el centro de la nave y los brazos laterales, y el cruce estaba coronado por la bóveda más grande. Con independencia del impacto escenográfico que hubiera supuesto su enorme tamaño, la innovación que aportaba Candela era el hecho de utilizar en un mismo espacio arquitectónico,

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



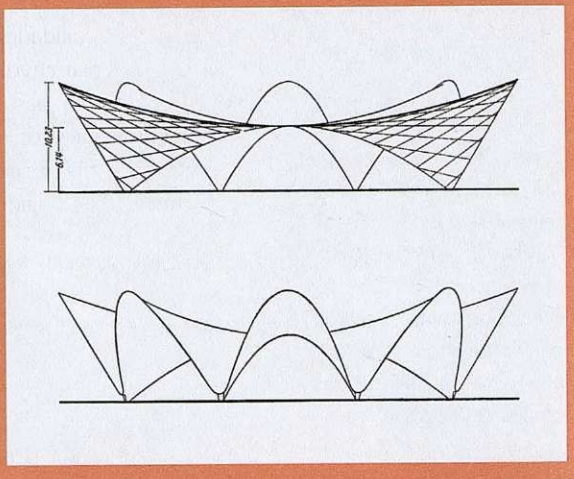
(F. 71 a)



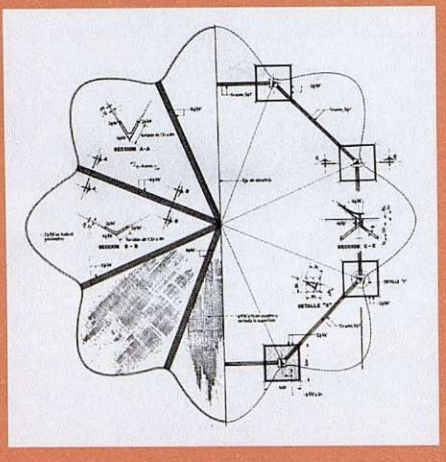
(F. 71 b)



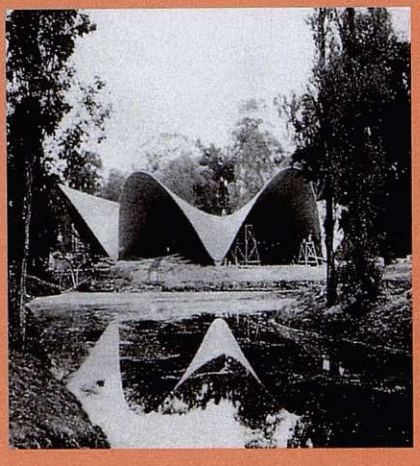
(F. 71 c)



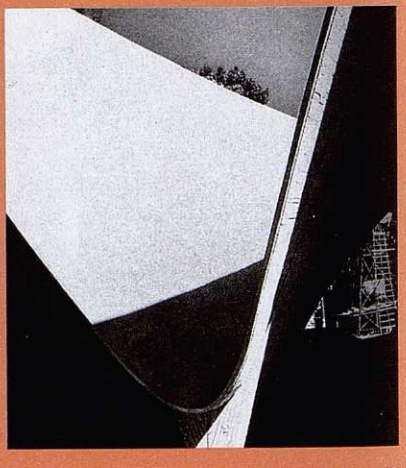
(F. 71 d)



(F. 71 e)



(F. 71 f)



(F. 71 g)

(F. 71 a, b, c, d, e, f, g)

Restaurante Los Manantiales
Xochimilco, México, 1958

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

la misma forma pero con diferentes tamaños. Al igual que en la catedral, podemos fácilmente imaginar el interesante juego de luz natural que Félix Candela creó en este espacio en el que la luz se filtraría por los espacios generados entre las diferentes alturas de coronación de los cascarones de hormigón armado. La luz, formando parte así del interior del espacio arquitectónico, enfatizaría las líneas geométricas de los cascarones, resaltando sus bordes libres. Desvelada la manera de disipar la dicotomía entre la idea y la forma, los cascarones de Félix Candela empezaron a transmitir inquietantes sentimientos de ligereza. Había conquistado la esbeltez de la forma resistente, liberando sus bordes y dotándola de una racional belleza.

A partir de este momento, Félix Candela construyó una gran variedad de cascarones de borde libre, con diferentes composiciones geométricas basadas en la macla de segmentos *hypar*, destacando de forma especial aquellas generadas como bóvedas de crucería.

Para generar esta variedad de formas, formadas por la misma forma geométrica base –el paraboloide hiperbólico reglado–, Félix Candela desarrolló otro discurso espacial de indudable interés, introduciendo como variables, además del tipo de paraboloide hiperbólico *hypar*, el número de cañones de la bóveda de crucería, su tamaño, inclinación, sistema de apoyos, forma geométrica de sus bordes y decalaje de la altura de coronación entre la clave central de la bóveda y las de sus bordes.

Como las posibilidades de combinar todos estos parámetros son casi inimaginables, Candela las utilizó para crear envolventes arquitectónicas muy diferentes. Este tipo de proceso de transformación de la forma, basado en la variabilidad paramétrica de sus elementos, fue la que realizaron también los maestros medievales con sus bóvedas de crucería modificando la forma geométrica de sus arcos formeros y fajones, y fundamentalmente el decalaje de altura de todas sus claves. Incrementaron la rigidez de sus bóvedas evolucionando hacia superficies de doble curvatura.

Entre las muchas bóvedas de crucería que construyó Candela se encuentran las siguientes: con cuatro cañones, la Bolsa de Valores de México (1955), San Antonio de Huertas en Tacaba (1956), la Embotelladora Bacardí en Cuautitlán Izcalli (1959-60) y la Oficina de Ventas en Guadalajara, Jalisco (1960); con ocho cañones, el Restaurante Los Manantiales en Xochimilco (1957-58) y la Iglesia en la Colonia La Florida, México D.F.; con cinco cañones, Hotel Casino La Selva en Cuernavaca, Morelos (1958); con tres cañones, el Club Nocturno Jacaranda en Acapulco (1957) y una bóveda por arista triangular en Oslo (1961).

El Restaurante de Los Manantiales en Xochimilco México (1957-58) es uno de los cascarones más famosos de Candela, siendo el más admirado no sólo porque en él alcanzó una gran esbeltez laminar y bordes libres sino también por el indudable impacto de su composición espacial. Se trata de una bóveda por arista octogonal formada por la intersección de cuatro paraboloides hiperbólicos iguales, en la que las curvas de sus bordes son hipérbolas por haber cortado la superficie mediante planos inclinados hacia el exterior.

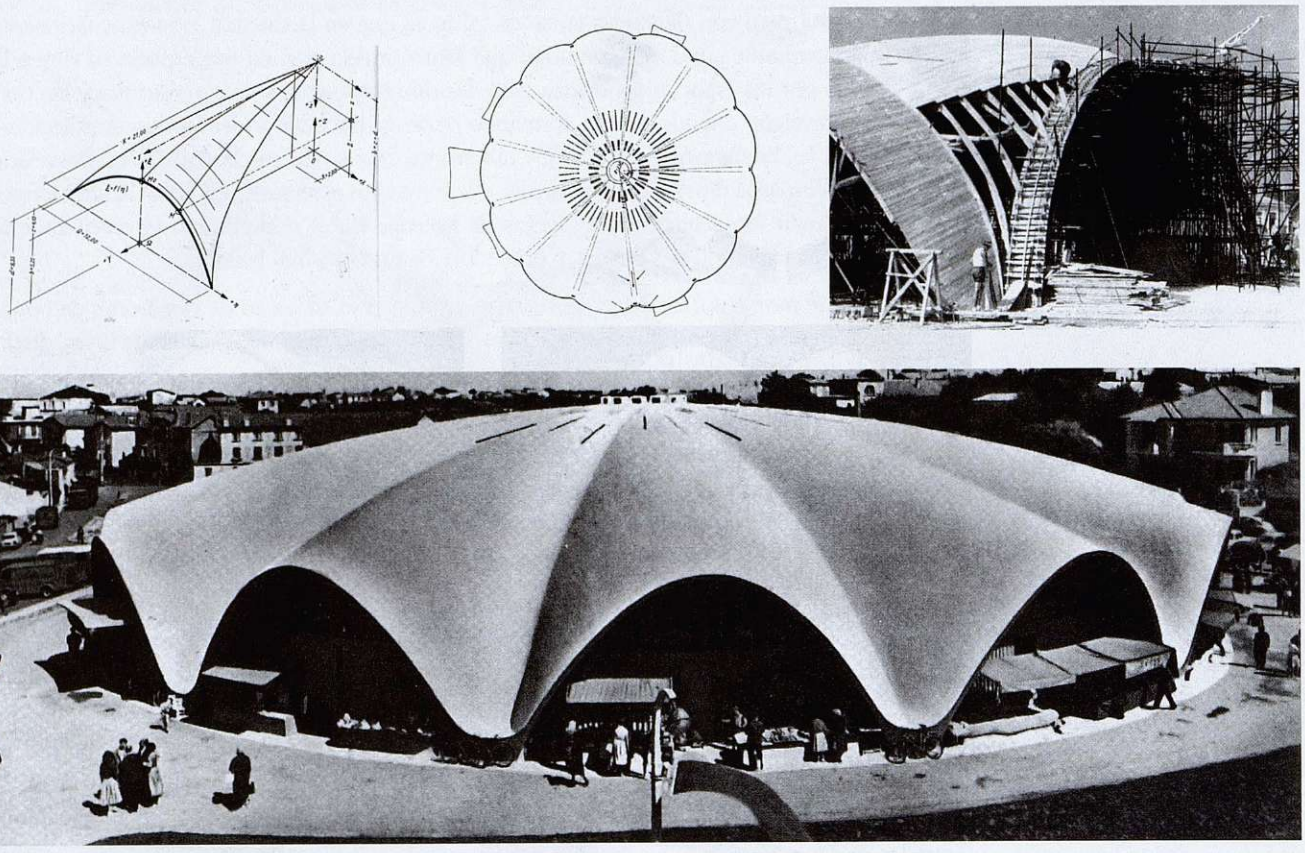
Visualmente el cascarón está dotado de un solo borde libre ondulado, pero tal y como explicó Candela, dado que para tener un borde libre cada segmento *hypar* necesita dos aristas que transmitan los esfuerzos de borde hasta los apoyos, desde el punto de vista estructural se trata realmente de la audaz macla espacial de ocho fragmentos *hypar* con ocho bordes libres [44].

El conjunto cuenta con ocho cañones iguales, cuyos apoyos se sitúan describiendo una planta circular. El vano libre es de unos 30m, y la proyección exterior de su borde de 42m de diámetro. El cascarón de hormigón armado fue construido con un espesor continuo de hormigón armado de 4cm, siendo uno de los de mayor esbeltez construidos en "la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna".

Otro de los aspectos que Candela cuida también, con especial interés y maestría, es el encuentro de la lámina de hormigón con sus apoyos. Generalmente, en lugar de integrar visualmente la superficie laminar en la masa del apoyo, vuela la lámina sobre el apoyo, de tal manera que ésta conserva en su totalidad la inquietante imagen escenográfica de su esbeltez y borde libres. Según Colin Faber, ésta era la estructura que Félix Candela consideraba más significativa de su propia obra. El diseño arquitectónico fue realizado por los arquitectos Joaquín y Fernando Álvarez Ordóñez.

Existía ya un precedente de similar geometría y mayor tamaño, que había sido construido en 1955 por René Sager. Era el Mercado de Royan (Francia) [45]. Se trataba de una innovadora

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 72, a, b, c, d)

Mercado de Royan
Francia, 1955
René Sager

estructura laminar generada por un fragmento de paraboloide de planta triangular, y geometría tan sólo similar a la utilizada por Candela en Xochimilco. La forma espacial de la lámina se había generado por la traslación y yuxtaposición de este módulo, que tan sólo cuenta con generatrices rectas en una de sus dos curvaturas, y no por el cruce de paraboloides hiperbólicos. Este hecho repercute en el encofrado de madera, que sólo en una dirección puede ser ejecutado por tablas rectas, complicando lógicamente su ejecución, al tener que utilizar formas curvas en la otra dirección.

La traslación y yuxtaposición del módulo de doble curvatura se desarrolla sobre una planta circular de 52,40m, generando 13 cañones apoyados sobre trece apoyos exteriores atados entre sí mediante un tirante. Esta lámina, precedente de alguna manera de la realizada por Candela en Xochimilco, tiene un espesor mucho mayor y discontinuo, siendo de 8cm en su clave, e incrementándose hasta los apoyos. Su menor espesor es el doble que el del cascarón de Candela, que sólo cuenta con 4cm. Por otra parte, la lámina del Mercado de Royan tiene nervios de rigidez de borde, aunque éstos están embutidos en el espesor total de lámina. Pero es importante resaltar que se trata de una estructura laminar que no responde a la geometría *hypar* utilizada por Candela, y de mucho mayor tamaño al tener una luz libre de vano de 52,40m, 22,40m superior a la realizada por Candela en Xochimilco. Tal vez, este importante incremento de tamaño en la diferente y específica geometría de Los Manantiales hubiera llevado consigo, al menos, un incremento de espesor. El hecho es que, al parecer, Candela no construyó nunca cascarones de hormigón armado que salvaran una luz libre de vano mayor de 30m.

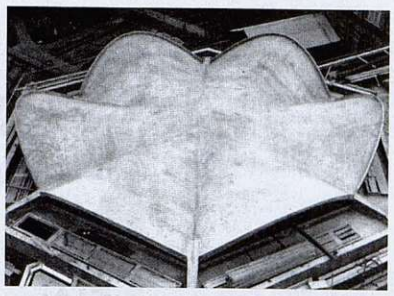
Al menos, los cascarones de hormigón armado más grandes e internacionalmente conocidos de Candela, salvan todos como máximo, esa luz libre de vano: el Restaurante Los Manantiales de Xochimilco, la Embotelladora de Bacardí y la Capilla abierta de Cuernavaca.

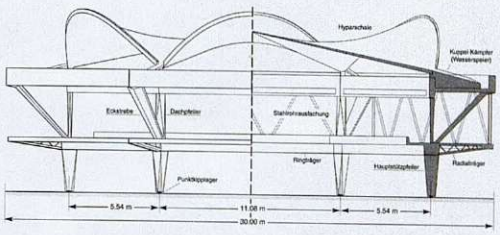
Este tipo de análisis comparativo pone de manifiesto algunas de las específicas aportaciones que cada arquitecto o ingeniero realizaron en el desarrollo de las *Thin Concrete Shells*, creando y construyendo diferentes formas y tamaños llenos de específicos matices, no sólo técnicos, geométricos, estructurales y constructivos sino también artísticos, aportando nuevas maneras de entender y sentir el espacio arquitectónico. Sin duda, Félix Candela aportó con la misma maestría eficacia estructural, esbeltez y belleza en su prolífero legado.

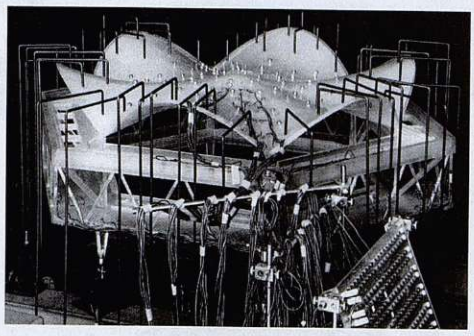
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

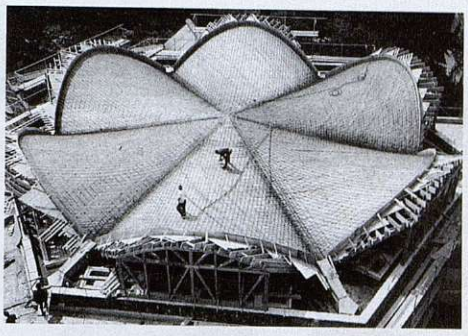
(F. 73 a, b, c, d)

Biblioteca de la Universidad de Basilea
Suiza, 1962-64
Heinz Hossdorf









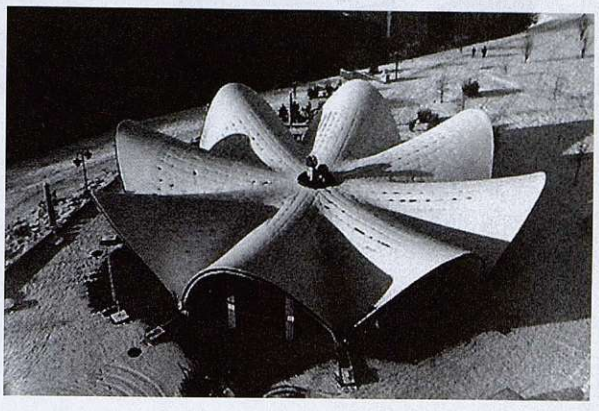
(F. 73 e)

Biblioteca de la Universidad de Basilea
Suiza, 1962-64
Heinz Hossdorf

(F. 74)

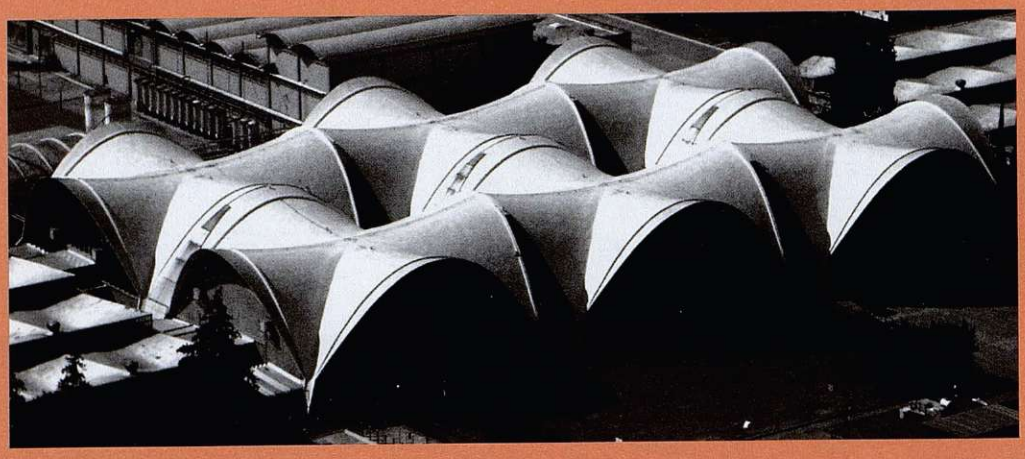
Café Seerose
Potsdam, 1980
Ulrich Müther



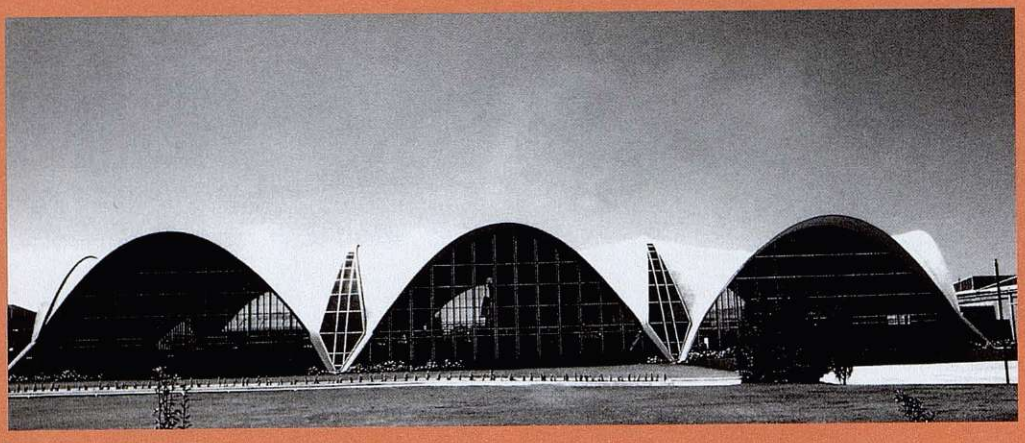


Años más tarde, Heinz Hossdorf, aportando otros innovadores aspectos estructurales diferentes a los de Félix Candela, proyectó en 1962, con el arquitecto Otto H. Senn, la cubierta laminar para la Biblioteca de la Universidad de Basilea. Esta estructura laminar estaba generada, en disposición radial, por la intersección de tres paraboloides hiperbólicos reglados iguales, que conformaban una bóveda por arista de seis cañones. Forma geométrica que en este caso sí es muy similar a la que años antes había construido Candela en Xochimilco, contando además con un tamaño muy parecido, ya que la luz de vano máxima de la estructura laminar de Hossdorf es también de 30m. Aunque debido a la gran inclinación de sus seis soportes, la lámina propiamente dicha cubre una superficie de diámetro menor, alcanzando tan sólo 22m. La peculiaridad de este caso es que la estructura laminar es la cubierta de la biblioteca, está ubicada en las dos últimas plantas de un edificio de seis, siendo necesaria la integración espacial y estructural de ambas volumetrías, manteniendo una terraza perimetral libre de 3,10 metros de vuelo, respecto del borde de la superficie laminar [46]. Hossdorf proyecta una ingeniosa sucesión de elementos estructurales colaborantes, que permite crear un espacio diáfano de doble altura en la sala de lectura. Las aristas interiores de la estructura laminar cuentan con nervaduras de refuerzo de canto invertido, que rigidizan el conjunto y absorben la concentración de tensiones, prolongándose mediante tornapuntas de pronunciada inclinación hasta el anillo pretensado del borde del voladizo, para absorber los empujes del conjunto laminar. Las cargas verticales se transmiten mediante pilares en forma de V que recogen a su vez el gran voladizo, transmitiéndose a una viga metálica triangulada de gran canto, coincidente con la altura de la planta inmediatamente inferior, que transmite las cargas verticales a los pilares de los pórticos ortogonales del resto de las cinco plantas del edificio situadas bajo rasante. Hossdorf realizó en su laboratorio, un ensayo físico de modelo reducido para comprobar su comportamiento estructural.

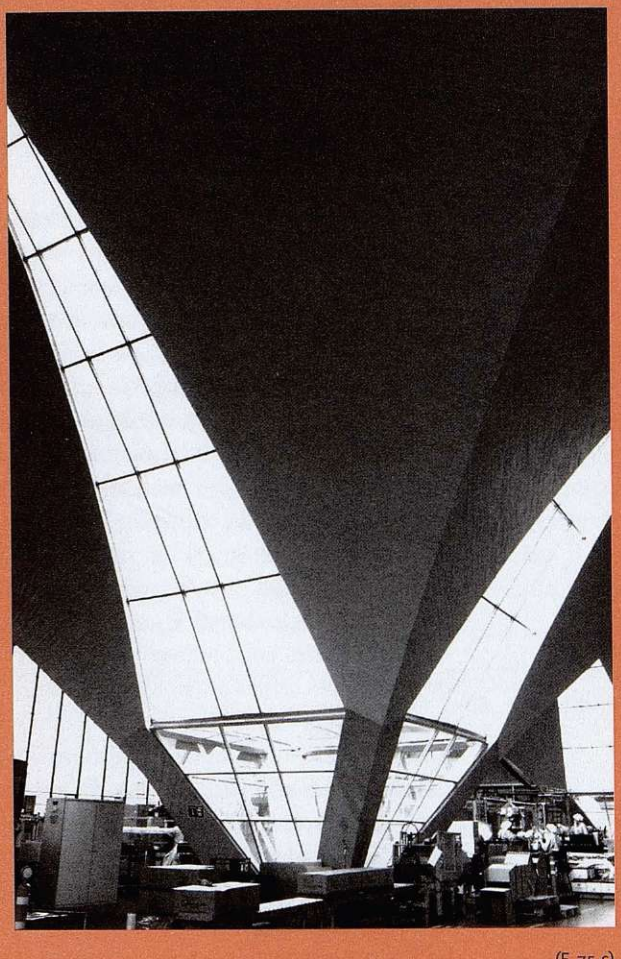
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 75 a)



(F. 75 b)



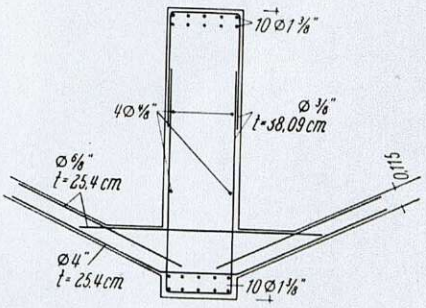
(F. 75 c)

(F. 75)

Embotelladora Bacardí
Cuautitlán Izcalli, México, 1959-60

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO





(F. 76 a, b)

Aeropuerto de San Luis
EEUU, 1954
Varios autores

En 1980 Ulrich Müther construyó en Potsdam (Alemania) el Café Restaurante Seerose, con una geometría visual similar a la de Los Manantiales de Xochimilco de Félix Candela.

Félix Candela construyó en la Fábrica Bacardí una amplia gama de cascarones de hormigón armado diferentes. Pero sin duda los de mayor atractivo e interés innovador son las bóvedas por arista que forman el conjunto de la cubierta de la Embotelladora Bacardí. Estos cascarones de borde libre se levantan sobre una planta simétrica cuadrada de 30m de lado, en cuyos vértices se sitúan los cuatro apoyos, salvando así una luz libre de vano de 30m, siendo la mayor bóveda por arista construida por Félix Candela con su empresa Cubiertas Ala. Se trata de un conjunto inicial de tres bóvedas por arista idénticas, que posteriormente se amplió a seis. La geometría de cada cascarón se genera mediante el cruce de dos paraboloides hiperbólicos reglados iguales, obteniéndose cuatro cañones cuyos bordes curvos adoptan la forma de una hipérbola, como resultado del corte oblicuo de la superficie generadora. El espesor de los cascarones es continuo de 4cm, hecho que le confiere una gran esbeltez. Otro de los mayores atractivos del conjunto de la cubierta es la composición espacial que construye Candela, uniendo entre sí los tres cascarones iniciales sobre una planta rectangular (30x90m), dejando entre ellos un amplio espacio para la penetración de la luz natural.

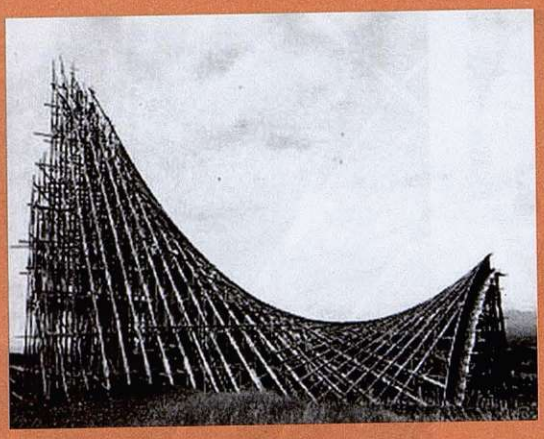
Años antes, en 1954, se había construido un interesante conjunto de cubiertas laminares en el aeropuerto de San Luis, EEUU, interviniendo Hellmuth, Yamasaki y Leinweber, Robert and Schafer Co., Anton Tedesco y William C.E. Becker. Se trataba de tres bóvedas de arista de simple curvatura, generadas por el cruce de dos cañones cilíndricos, resultando cuatro cañones perpendiculares entre sí [47]. En este caso, las bóvedas de arista se desarrollan sobre una planta cuadrada de lado 36,57m (6m mayor que la planta de las bóvedas de Bacardí). El espesor de la lámina no es continuo, contando con 11,5cm en las partes más altas de las superficies y 20cm en las zonas de los apoyos, en lugar del espesor continuo de 4cm del cascarón construido por Candela en Bacardí. Por otra parte, las láminas del aeropuerto, lejos de contar con bordes libres, tienen nervaduras de borde y nervaduras diagonales de gran canto invertido, que se manifiestan al exterior. Es éste un ejemplo de cómo la utilización de superficies de simple curvatura demanda elementos rigidizantes, que las de doble curvatura no necesitan, al menos en un determinado y específico rango de tamaños, hecho que las leyes de la Naturaleza demuestran diferente para cada forma geométrica.

Capilla abierta de Cuernavaca

La Capilla abierta en Lomas de Cuernavaca, Morelos, México (1958-59) es otro de sus más impactantes y grandes cascarones de hormigón armado. Esta vez se trata del de mayor altura construido por Canela. Los arquitectos fueron Guillermo Rossel y Manuel Larrosa.

La geometría está generada por un solo paraboloide hiperbólico, que es cortado por varios planos, obteniéndose la forma comúnmente denominada "silla de montar", que Candela proyecta con una gran diferencia de altura y luz de vano libre en cada una de sus dos bocas curvas abiertas. La planta de la Capilla está definida por dos parábolas idénticas y opuestas, que constituyen los lados curvos empotrados en el terreno. Los otros dos extremos quedan abiertos, salvando el mayor de ellos una luz de 30m. Originalmente fue proyectada y construida con una altura de 24m, pero debido a que durante el descimbrado se desplomó su parte más alta Félix Candela la reconstruyó con una menor altura, que finalmente alcanzó 21,90m.

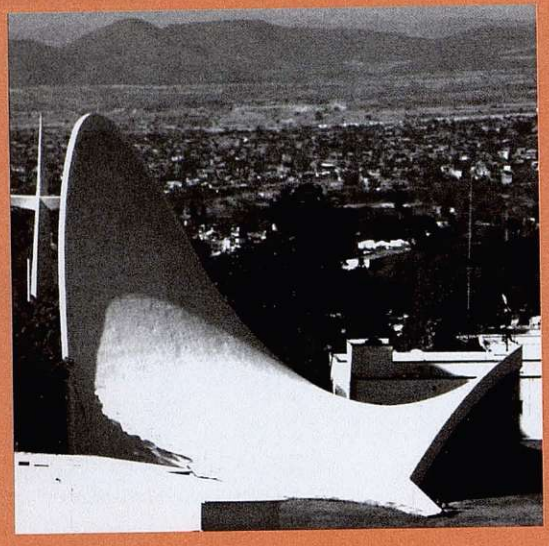
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



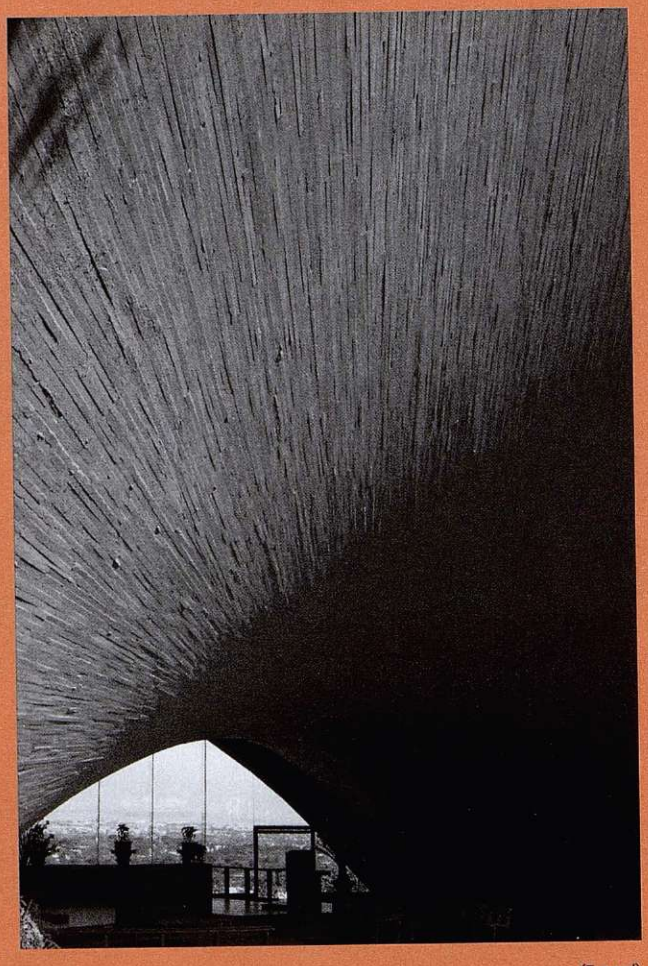
(F. 77 a)



(F. 77 b)



(F. 77 c)



(F. 77 d)

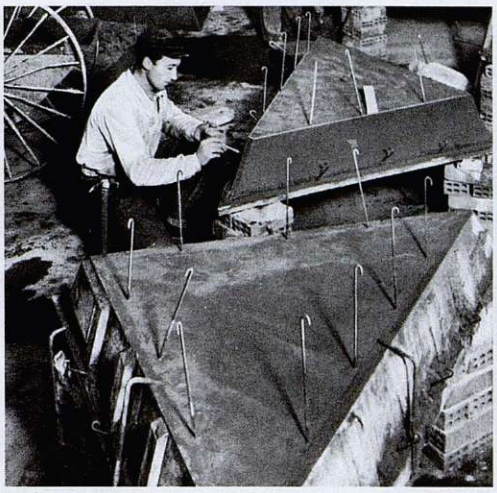
(F. 77 a, b, c, d)

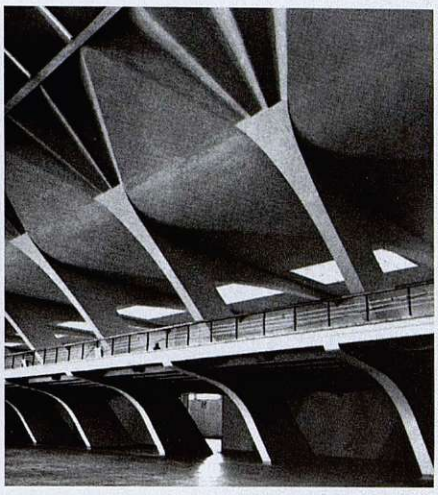
Capilla abierta en Lomas de Cuernavaca
Morelos, México, 1958-59

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

(F. 78 a, b)

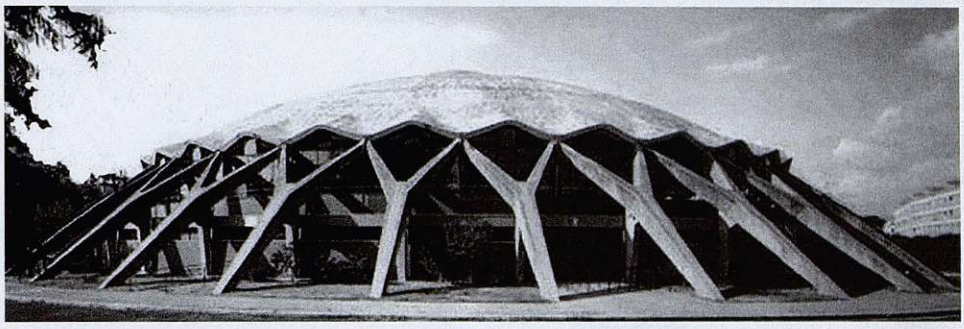
Palacio de Exposiciones
Turín, 1948-49
Pier Luigi Nervi





(F. 79)

Palazzetto dello Sport
Roma, 1953-58
Pier Luigi Nervi



Félix Candela, siguiendo sus propios criterios, a los que había llegado en base a las simplificaciones de cálculo que le permitía la geometría del *hypar*, proyecta y construye este cascarón con un solo borde libre, el de mayor luz de vano (30m) y altura (24m), incluyendo un nervio de rigidez en el borde opuesto. En este caso, dado su tamaño, el espesor de la lámina, en lugar de ser continuo de 4cm, se regruesó, alcanzando en los apoyos 52cm. Pero además, dada su altura, por la acción del viento desde la parte posterior de la gran boca de acceso, su borde abierto está sometido a fuerzas de compresión que no podían ser soportadas por la lámina proyectada. Por esta razón, Félix Candela explica que la dotó de una costilla a compresión a lo largo del labio.

Según los análisis realizados por medio de la aplicación del Método de Elementos Finitos, por Jean H. Prevost, Maria Moreyra Garlock y Christin E. Holzer [48], los métodos de diseño y comprobación utilizados por Félix Candela le sirvieron para optimizar la eficacia estructural de la forma geométrica y espesor de la lámina. Y dado que estos análisis están realizados contando con la altura de 24m, parece claro que el desplome acaecido durante el descimbrado debió ser provocado por defectos de construcción o descimbrado prematuro.

En cualquier caso, lo que queda demostrado, una vez más, es que Félix Candela se auto-capacitó para ser libre y poder construir sus propias ideas, imponiéndose la disciplina de la eficacia, no sólo de la forma resistente en sí misma sino también de su proceso de cálculo y construcción.

La aventura laminar...

Retomando nuevamente algunos de los hechos más destacables acaecidos en el contexto internacional de las *Thin Concrete Shells*, durante la década de los años 50 es cuando Pier Luigi Nervi (1891-1979) realiza gran parte de sus más famosas estructuras laminares, adaptando a diferentes geometrías el mismo sistema constructivo mixto que ya utilizó en sus primeras láminas, construidas en los años 30 para diferentes hangares de las Fuerzas Aéreas italianas [49].

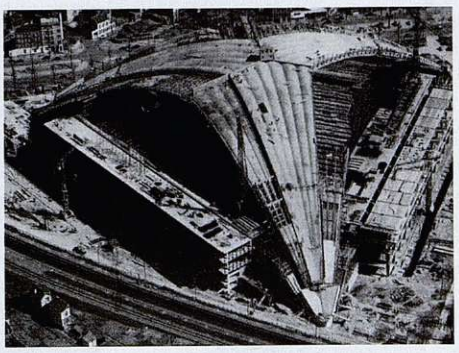
Este sistema optimizaba el coste de obra, racionalizando el proceso de construcción, y consistía en la utilización de piezas prefabricadas, ejecutadas a pie de obra, y nervaduras vertidas *in situ*. No en vano, Pier Luigi Nervi no sólo fue conocido como un "gran escultor de espacios arquitectónicos" sino también como una especie de "mago del control exhaustivo del coste de sus obras". La imagen nervada de sus estructuras laminares es sin duda uno de los más destacados y reco-

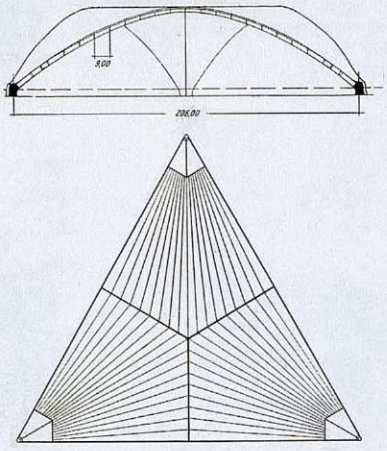
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

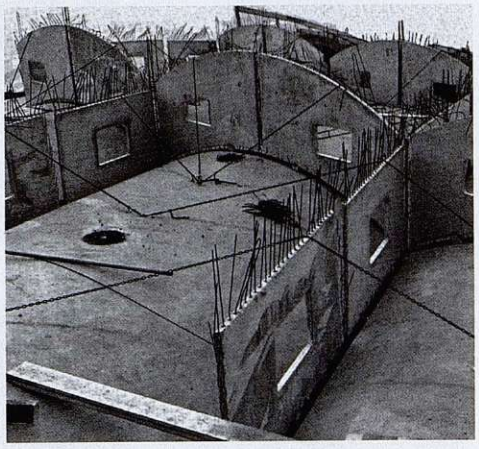
(F. 80 a, b, c, d)

CNIT Centre des Nouvelles Industries et Technologies
París, 1956-58
Varios autores









nocibles sellos de su obra. Unida a la geometría de las láminas y de sus apoyos, aporta al observador un claro entendimiento de la función de cada elemento estructural en la absorción de esfuerzos. Por esta razón, la manifiesta claridad estática de sus obras, generalmente Nervi inclina los apoyos de sus láminas siguiendo la dirección de la resultante. Entre las estructuras laminares construidas por Nervi en los años 50 están el Casino de Ostia, realizado con la colaboración del arquitecto Atilio La Padula (1950), el Almacén para la sal en Tortona (1951), la sede de la UNESCO en París con los arquitectos Marcel Breuer, Bernard Zehrfuss y Antonio Nervi (1953-1958), la Central de Tranvías de Turín (1954), la Fábrica de Tabaco de Bolonia, el Palazzetto de Deportes de Roma, en colaboración con el arquitecto Annibale Vitellozzi (1956-1957), que cubre una planta circular de 50m de diámetro formado por 1.620 elementos romboidales prefabricados de 2,5cm de espesor, y el Palacio de Deportes de Roma (1958-1959), en colaboración con Marcelo Piacentini, con diámetro de 100m y con 144 nervios que recogen los elementos prefabricados.

El gigante... CNIT

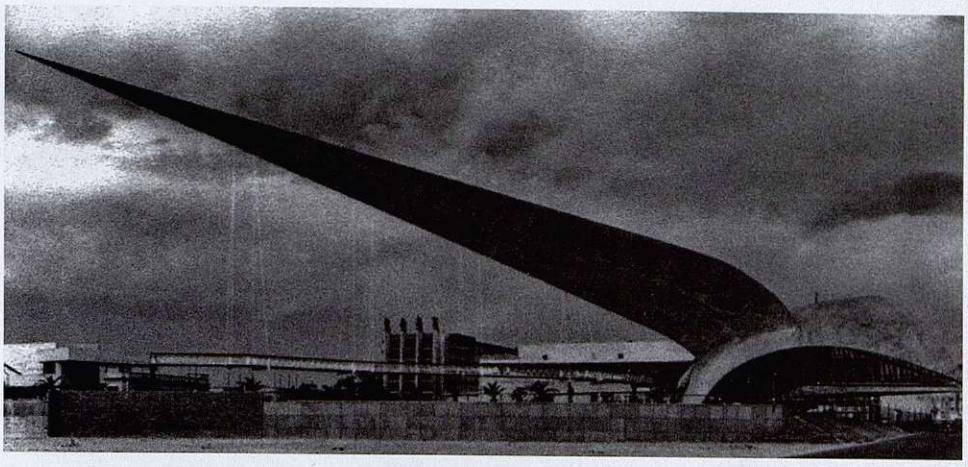
Pier Luigi Nervi, al final de la década de los años 50, colaboró en el proyecto y construcción de uno de los más importantes hitos de "la Aventura Laminar", el CNIT Centre des Nouvelles Industries et Technologies de París (1956-1958), que alcanzó el mayor tamaño y luz de vano entre apoyos jamás salvada por una bóveda laminar de hormigón armado o pretensado. Al igual que el record de tamaño de las antiguas bóvedas pétreas lo ostenta el Panteón de Agripa en Roma, cuya cúpula alcanzó 43,44m de diámetro, no siendo jamás superado su tamaño, el CNIT de París es todavía la mayor estructura laminar de hormigón armado y pretensado construida en todos los tiempos. Esta mítica obra fue el resultado de la colaboración de un representativo número de arquitectos e ingenieros de la ya consagrada Modernidad, entre los que se encontraban varios expertos en la creación y construcción de *Thin Concrete Shells*: Robert Edouard Camelot, Jean de Mailly, Bernard Louis Zehrfuss, Nicolas Esquillan, Jean Prouvé y Pier Luigi Nervi. La estructura laminar fue diseñada por el ingeniero Nicolas Esquillan con la asesoría y colaboración de Pier Luigi Nervi, siendo el autor de la fachada de vidrio el ingeniero Jean Prouvé. La construcción fue realizada por Balance et Schuhl, Boussiron y Coignet [50].

La estructura laminar cubre una planta triangular de 22.500m², contando con tan sólo tres apoyos que, situados en sus vértices, distan entre sí 218m. Se trata de una estructura laminar ondu-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

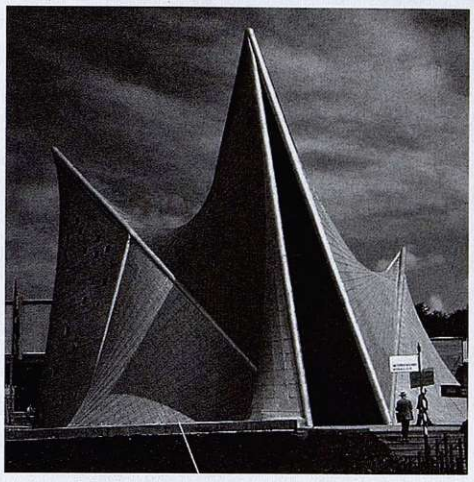
(F. 81)

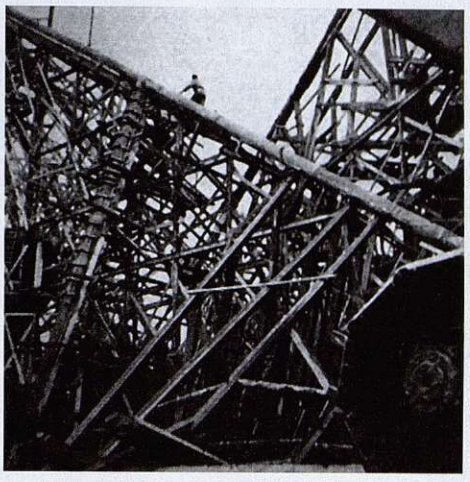
Gran flecha del genio civil
Exposición de Bruselas, 1958
André Paduart



(F. 82 a, b)

Pabellón Phillips
Exposición de Bruselas, 1958
Le Corbusier





lada de doble hoja, cuya geometría responde a la de una bóveda de crucería de tres cañones. El importante aumento de tamaño demandaba un relevante incremento de rigidez de la forma. La forma que utilizaron para optimizar su trabajo estructural fue proyectarla ondulada, pretensada y de doble hoja. Se realizó con elementos prefabricados y, al igual que en el delicado proceso de construcción y cierre de una bóveda gótica, el proceso de colocación de sus piezas fue detenidamente analizado para optimizar los diferentes estado de equilibrio durante su construcción, avanzando de forma consecutiva en los tres cañones que definen su completa volumetría.

En esta prolífera década, en la que se construyeron una gran cantidad de estructuras laminares, la mayor parte de los máximos representantes de la Modernidad quisieron probar esta experiencia, aunque fuera tan sólo en algunos de sus proyectos. Éste fue el caso, entre otros muchos, de Le Corbusier (1887-1965), Richard Neutra (1892-1970), y Ernst Neufert (1900-1986). En los años 50 los cascarones de hormigón armado y pretensado protagonizaban gran parte de los anhelos del mundo técnico, prueba de ello fue el conjunto de propuestas y proyectos realizados en la Exposición Universal e Internacional celebrada en Bruselas en 1958, la primera que se realizó tras la finalización de la Segunda Guerra Mundial. En efecto, aunque el Atomium fue el símbolo de la Exposición, que representaba los avances técnicos obtenidos por la industria belga del acero y el aluminio, y aunque la mayor parte de los pabellones contaba con estructura metálica, dadas las indudables ventajas que este material representa frente a su posterior desmontado, se construyeron numerosas e innovadoras estructuras laminares de hormigón armado y pretensado, entre las que destacaron especialmente el Pabellón Phillips, proyectado por Le Corbusier, y la gigantesca flecha construida por el ingeniero André Paduart y el arquitecto Jean van Doosselaere.

La gran flecha de la Exposición estaba situada sobre un enorme mapa de Bélgica en el que se situaban las principales obras y proyectos realizados de carreteras, puertos, aeropuertos... por ello era necesario que la pasarela peatonal que sobrevolaba dicho mapa no tuviera apoyos sobre éste, sino que estuviera colgada de otra estructura. Se trataba de una ménsula de 80m de

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

longitud, que apoyaba en uno de sus extremos en el suelo, estando su vuelco impedido mediante un contrapeso. Los autores del proyecto construyeron un contrapeso consistente en una sala triangular de 28m de lado cubierta con una cúpula laminar de hormigón armado que se prolongaba hasta el suelo en uno de sus extremos, formando unas patas rígidamente unidas en su cimentación al apoyo de la ménsula, constituyéndose en un trípode que daba al conjunto la necesaria estabilidad. (F. 81) [51]

El Pabellón Philips proyectado por Le Corbusier (1887-1965) y el ingeniero Iannis Xenakis fue el más revolucionario e innovador de todos los pabellones construidos en Bruselas (F. 82) [52]. Su interés no radicó únicamente en su novedosa estructura laminar postesada, construida con piezas de hormigón armado prefabricadas a pie de obra, sino que además es un hito en la historia de la Arquitectura Moderna. Su espacio arquitectónico fue proyectado para ser capaz de contener el *poema electrónico* compuesto por el músico e ingeniero Iannis Xenakis y reflejar en su interior imágenes proyectadas sobre su piel laminar al riguroso compás de la música. En el proyecto colaboraron también Edgar Varese y W. Tak, técnico de la empresa Philips, el editor Jean Petit, el cineasta Philippe Agostini, y el ingeniero Hoyte Duyster de la empresa constructora belga Strabed. Esta innovadora obra se levantaba sobre una planta de 400m² de superficie, con un trazado irregular que definía un recorrido sinuoso con forma de estómago. El espacio está definido en su totalidad por una estructura laminar formada por la macla de doce fragmentos de diferentes paraboloides hiperbólicos, en cuya volumetría destacan tres vértices de alturas 20,18 y 13m. Las generatrices de unión entre paraboloides se materializaron mediante elementos de sección circular de 40cm de diámetro, a través de las cuales se transmitían al terreno los esfuerzos de borde de los doce fragmentos laminares. El espesor de la lámina era de 5cm, y estaba formado por piezas prefabricadas a pie de obra sobre lecho de arena para adoptar su conveniente geometría. Posteriormente, la lámina se postesó mediante alambres de acero de 7mm de diámetro, siguiendo las direcciones de las generatrices rectas de la superficie laminar.

También fueron estructuras laminares de hormigón armado el Pabellón de las Naciones Unidas, cuya cubierta era una lámina de casquete esférico cortada por seis planos inclinados y apoyada en seis puntos, con un espesor total de 8cm cubriendo una luz de 50m; así como el Pabellón de Brasil, proyectado por los arquitectos Sergio Bernándes y Nicolai Ficoff, que contaba con una cubierta laminar colgada muy original cubriendo una planta sensiblemente rectangular de 60x25m. Los cables sustentantes estaban dispuestos en el sentido de mayor longitud de la cubierta y sus cuatro bordes se rigidizaron mediante vigas metálicas trianguladas de trazado curvo. La estabilidad del conjunto se debía a la ubicación de cuatro torres metálicas trianguladas en los vértices de la cubierta. La lámina, de reducido espesor de hormigón, se ejecutó sobre un encofrado perdido de chapas de amianto-cemento. Con independencia del material utilizado en su estructura (acero, madera u hormigón), existió una gran variedad de estructuras colgadas: EEUU, URSS, Vaticano, Brasil, Cooperación Europea... destacando especialmente la del Pabellón de Francia proyectado por el arquitecto G. Guillet, en colaboración con los ingenieros Bernard Lafaille, Vallée y René Sarger, cuya estructura de cubierta estaba formada por dos redes de cables de acero tensados y anclados a las vigas de borde de la superficie alabeada.



(F. 83)
Logotipo de la IASS, 1959

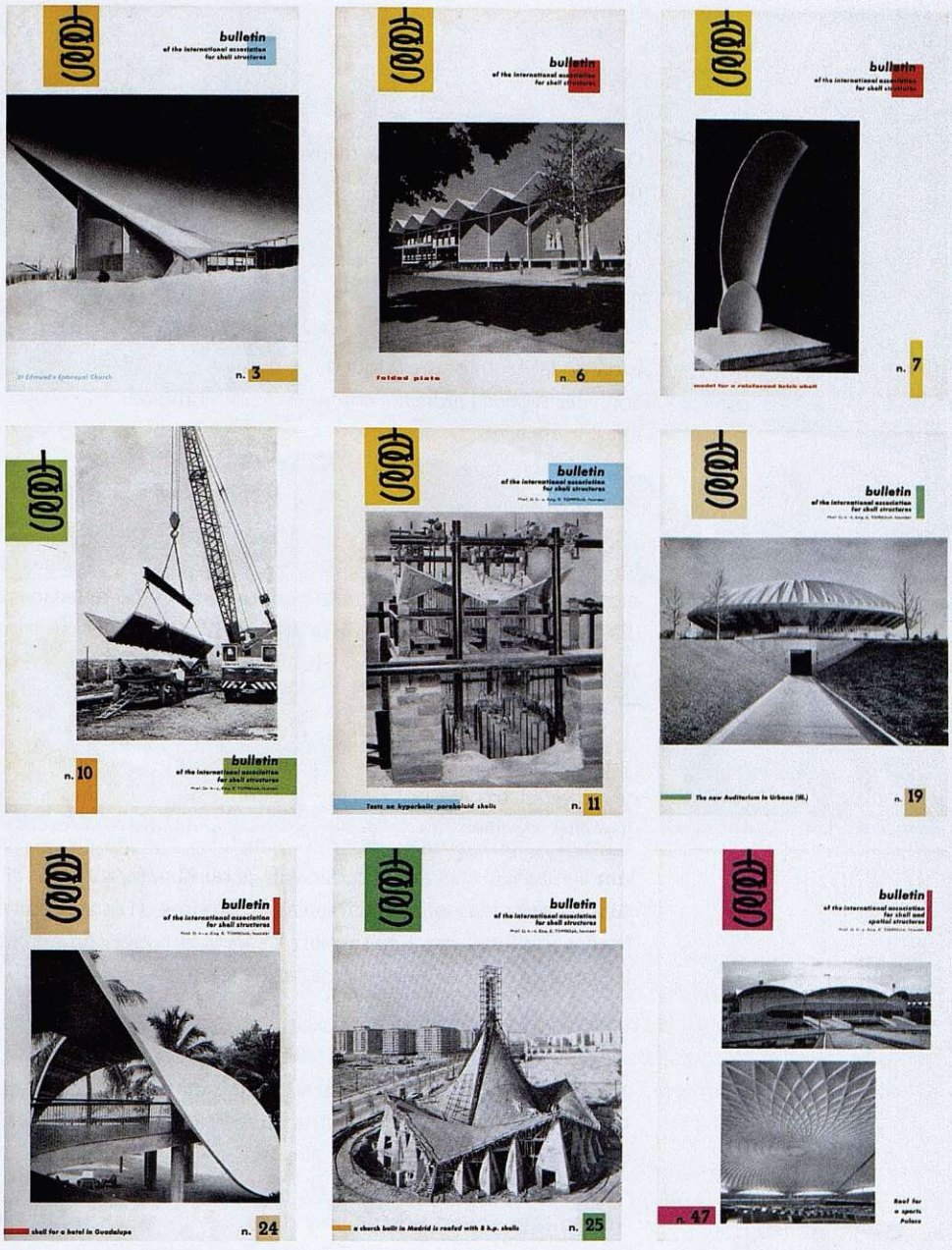
INSTITUTO EDUARDO TORROJA / IASS (1959-1970)
INTERNACIONAL ASSOCIATION FOR SHELL STRUCTURES

Del 16 al 20 de septiembre de 1959 se celebró en el Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento de Madrid, un coloquio internacional bajo el título *Coloquio internacional sobre procesos constructivos no tradicionales de estructuras laminares*. En esta reunión, a propuesta de Eduardo Torroja, se fundó la IASS Internacional Association for Shell Structures. En este coloquio intervinieron más de 100 especialistas de diferentes países: Alemania, Argentina, Brasil, Bélgica, Sri Lanka, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Holanda, Inglaterra, Italia, Japón, Noruega, Polonia, Portugal, Suecia, Suiza y Uruguay. Entre ellos se encontraban un gran número de los más destacados protagonistas de la construcción y desarrollo de las *Thin Concrete Shells*: A. Paduart, W. Zerna, K.W Johansen, H. Rüle, Müller, R.S. Jenkins, W. Poniz, A.L. Parme, E. Giangreco, A.M. Hass, M. Hahn, N. Esquillan, Tsuboi, Arup, H. Isler... entre otros muchos [53].

Eduardo Torroja propuso la creación de esta asociación internacional con el fin de establecer una entidad reglada, a través de la cual se pudieran intercambiar ideas y experiencias, difundiendo las innovaciones que en cada momento y lugar se fueran produciendo. De forma con-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 84)
Selección de portadas del *Bulletin* de la IASS

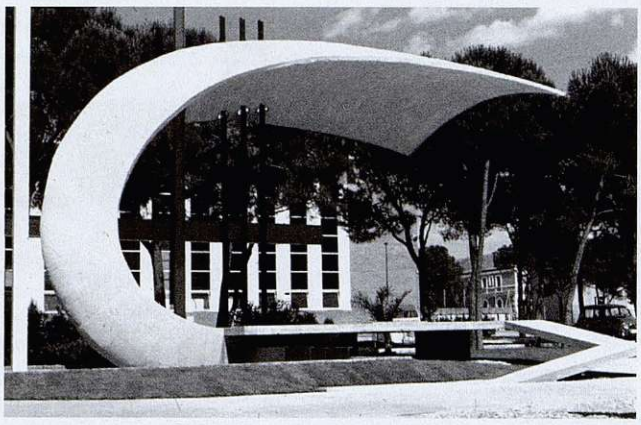


tinua desde entonces, la IASS celebra encuentros, jornadas y congresos internacionales, que sirven de foro de debate y difusión. Otra de las actividades más relevantes de esta asociación fue la creación de equipos de trabajo sobre temas específicos de interés, así como una publicación que, bajo el nombre de *Bulletin of the Internacional Association for Shell Structures*, se publicó desde el primer momento, difundiendo parte de los resultados e intervenciones en los congresos, así como obras de indudable interés, siempre en referencia a los diferentes y múltiples aspectos del desarrollo de las *Thin Concrete Shells*: ensayos sobre modelos reducidos, sistemas de cálculo, formas geométricas resistentes, procesos de obra, prefabricación... El impacto a nivel internacional fue de tal envergadura que no sólo se difundieron los avanzces alcanzados en este campo de la construcción civil y arquitectónica sino que el número de sus miembros creció de forma vertiginosa en todos los países.

El primer comité de la IASS estaba formado por miembros de diferentes países: presidente, Eduardo Torroja (España); vicepresidentes, A.L. Parme (EEUU) y W. Olszak (Polonia); miembros, A. Aas Jackobsen (Noruega), A.L.L. Baker (Gran Bretaña), N. Esquillan (Francia), A.M. Haas (Holanda), R.S. Jenkins (Gran Bretaña), K.W. Johansen (Dinamarca), F. Levi (Italia), O.D. Oniashvill (URSS), A. Paduart (Bélgica), H. Rüle (RDA) y W. Zerna (República Federal Alemania); secretario, Florencio del Pozo (España).

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 85)

Patio de los Alarifes
ITCC Madrid: Fundación IASS
Eduardo Torroja, 1959

(F. 86)

Patio de los Alarifes
ITCC Madrid
José Antonio Torroja
y Fernando Cassinello, 1969

El 16 de septiembre de 1959, Eduardo Torroja recibió a los congresistas en el Patio de Alarifes del Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento ITCC, mostrándoles las dos láminas experimentales que había construido para celebrar este acontecimiento (F. 85). Diez años después, en 1969, se construyó otra estructura laminar en el mismo sitio, que a modo de monumento permanente, recuerda la relevante historia acaecida (F. 86) [54].

Durante la década de los años 60, la increíble actividad de investigación, construcción, reglamentación y difusión internacional, realizada por los miembros de la IASS, desembocó en una enorme popularidad de este tipo de estructuras de hormigón armado y pretensado. La Arquitectura y la Ingeniería construyeron algunas de sus más representativas obras utilizando diferentes tipos estructurales y constructivos. Los grandes maestros ya consagrados, continuaron aportando nuevas e innovadoras obras al patrimonio de la Arquitectura, que fueron difundidas y debatidas en los congresos y reuniones de la IASS. La colaboración y aportaciones realizadas por Pier Luigi Nervi y Félix Candela, desembocaron posteriormente en su nombramiento como miembros de honor de la IASS.

Entre los más jóvenes protagonistas del apogeo final de las *Thin Concrete Shells*, destacan los ingenieros Heinz Hossdorf (1925-2006) y Heinz Isler (1926-2009), y el arquitecto alemán Ulrich Müther (1934-2007). Isler fundó su propia oficina en Burgdort en 1954, desarrollando dos años más tarde el concepto de las estructuras laminares neumáticas. En 1959 intervino en Madrid en el primer coloquio de la IASS. En 1968 construyó las primeras láminas textiles suspendidas. Durante la década de los años 60, 70 y 80 proyectó y construyó numerosas estructuras laminares de hormigón armado de muy diferentes tipos, entre ellas: Wyss Garden Center en Solothum, Suiza (1962), lámina cupular de 19m de diámetro, Centro Coop en Biasca, Suiza (1963), Centro Heimberg de Tenis (1966), Estación de Servicio Berna-Zúrich (1968), Oficinas Sicli Company Building en Ginebra, Suiza (1969-1970), Garden Center Burgi, Suiza (1971), Grötzingen Teatro de la Naturaleza (1977), y el Dübendorf Museo del Aire (1987).

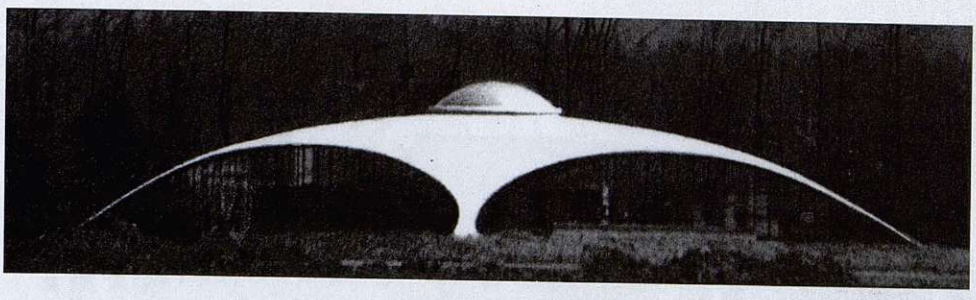
Heinz Hossdorf (1925-2006) también construyó durante la década de los años 60 y 70 algunas de sus más relevantes obras. En 1964, en el Almacén Wagen, Hossdorf inventó el postesado aéreo, sacando fuera de la masa del hormigón la armadura postesa, optimizando así la sección resistente de hormigón. Utilizó piezas prefabricadas, de 8,40x1,40m de desarrollo en planta y 4,5cm de espesor, con una directriz curva que permitía unir 18 unidades mediante postesado aéreo formando módulos independientes de 8,40m de ancho y 25,20m de luz entre apoyos (F. 90). En la Exposición de Lausana de 1964, construyó un novedoso pabellón abierto formado por módulos laminares pretensados, ejecutados con poliéster reforzado con fibra de vidrio, la primera vez que un material plástico formó parte de una cubierta laminar arquitectónica. En 1968 construyó la cubierta del Teatro Municipal de Basilea, una lámina colgada pretensada de gran tamaño [55].

Ulrich Müther inició su actividad profesional en 1961 en la República Democrática Alemana (RDA) tras la construcción del Muro de Berlín. Conocido como el "constructor de la provincia de Rügen" [56], desarrolló una prolífera producción de estructuras laminares, entre las que se encuentran: "Teapot" en Warnemünde (1967-68), Restaurante Ostseeperle en Glowe (1968), Mehrzweckkaufhalle en Rostock (1968), Ausstellungszentrum Hyparschale en Magdeburgo

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

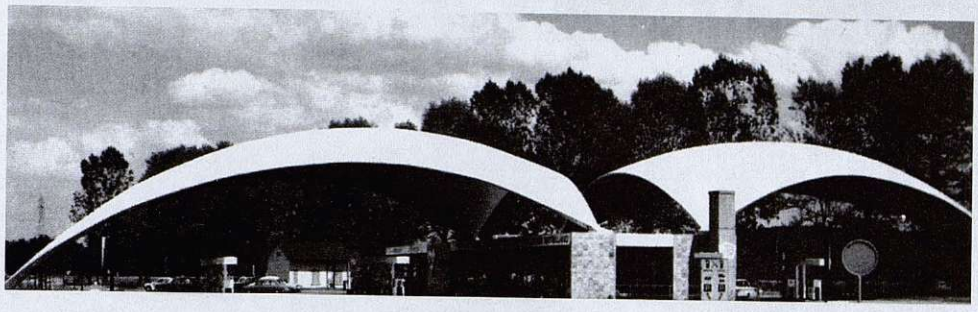
(F. 87)

Garden Center
Burgi, Suiza, 1971
Heinz Isler



(F. 88)

Estación de Servicio
Berna-Zúrich, 1968
Heinz Isler



(F. 89)

Teatro Municipal
Basilea, 1968
Heinz Hossdorf

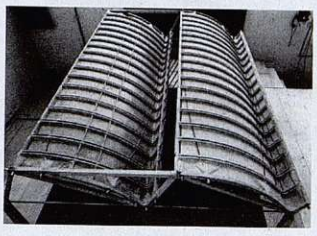
(F. 90)

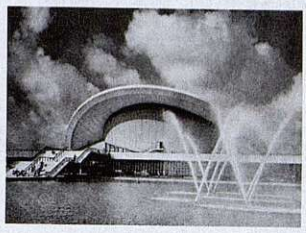
Almacén Wagen, 1964
Heinz Hossdorf

(F. 91)

"Teapot"
Warnemünde, 1968
Ulrich Müther







(1969), Gaststätte "Ahornblatt" en Berlín (1973), Café y restaurante Seerose en Potsdam (1980), Planetarium de Wolfsburg (1983), Musikpavillon Kurmuschel en Sassnitz (1987). Gran parte de su obra presenta una clara influencia de Félix Candela no sólo en el uso del paraboloide hiperbólico sino también en algunas de sus composiciones geométricas, como en la del café Seerose, que se asemeja a la cubierta laminar construida por Félix Candela en el restaurante de Xochimilco en 1958 (F. 74).

Durante "la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna", se construyeron una enorme cantidad de *Thin Concrete Shells* de muy diferentes formas resistentes. Las mostradas aquí son tan sólo una pequeñísima muestra.

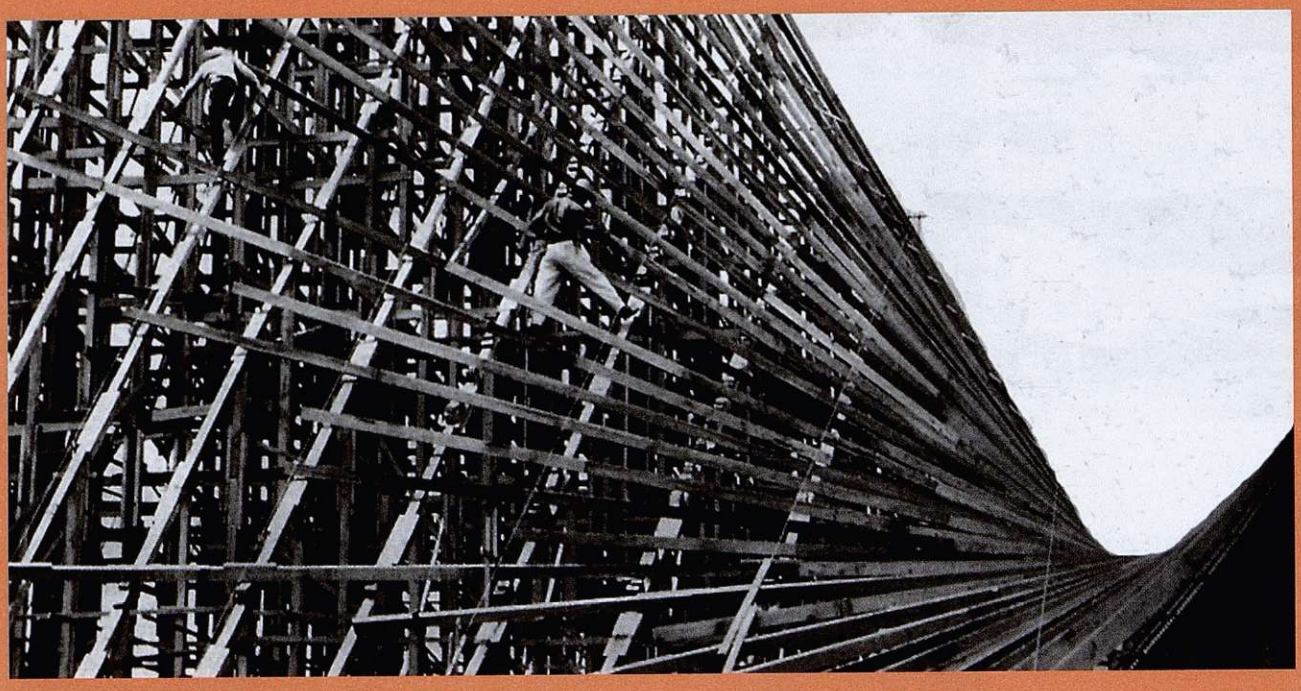
El fin de la Aventura Laminar de las *Thin Concrete Shells*

Una vez conquistada la cima de su conocimiento, a finales de los años sesenta, el protagonismo internacional de las *Thin Concrete Shells* se había desvanecido. Su lugar lo ocuparon nuevos tipos de estructuras ligeras metálicas, incorporándose también, de forma paulatina, otras estructuras espaciales ejecutadas con nuevos materiales. No en vano, fue precisamente en el año 1969 cuando la IASS Internacional Association for Shell Structures, decidió cambiar su nombre, y sin modificar sus siglas, en 1970, pasó a llamarse Internacional Association for Shell and Spatial Structures. A partir de este momento, se ocupó de todo tipo de estructuras espaciales, no limitándose a las láminas de hormigón, que siguieron construyéndose de forma muy poco generalizada, hasta prácticamente desaparecer al final de los años 70. De esta manera, quedaron también integradas en la IASS las estructuras ligeras, sobre las que Frei Otto se ocupó especialmente de su investigación desde 1964, en el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart (Institut für leichte Flächentragwerke) [57].

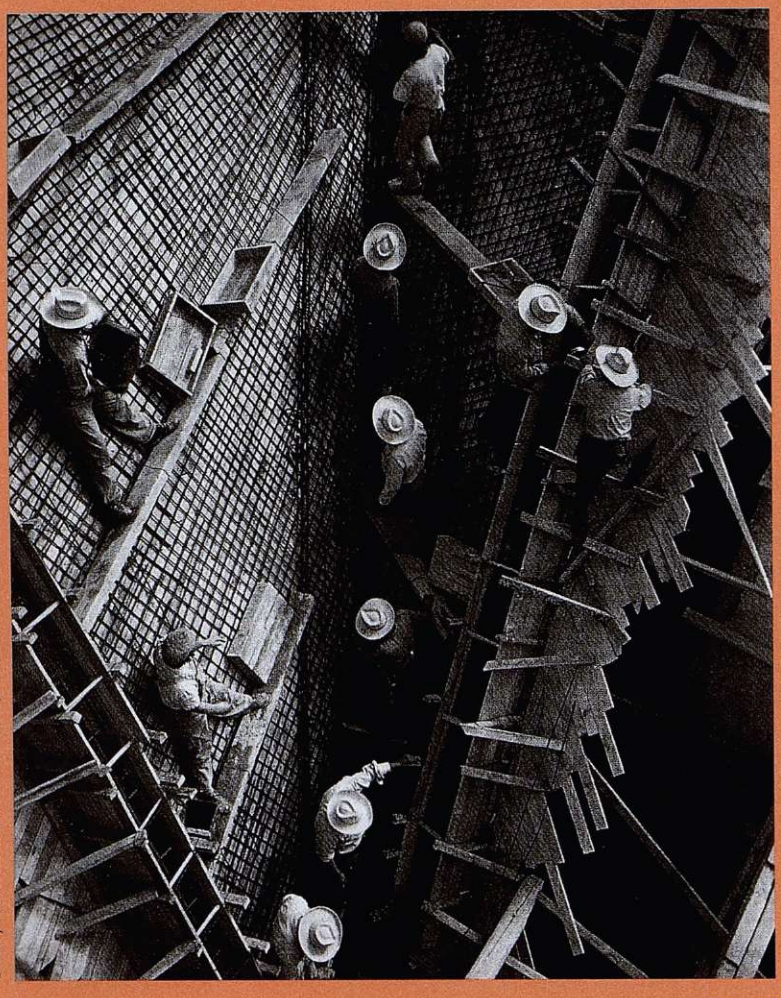
Actualmente la IASS, bajo la dirección de John F. Abel, continúa realizando la relevante labor para la que fue fundada bajo la presidencia de Eduardo Torroja, habiéndose incorporado, desde entonces, todos los tipos de estructuras espaciales que han ido surgiendo en el contexto internacional.

El propio Félix Candela, en 1968, construyó con estructura metálica el Palacio de Deportes de México, una de las últimas obras que realizó en México con su empresa Cubiertas Ala. Además

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 92 a)



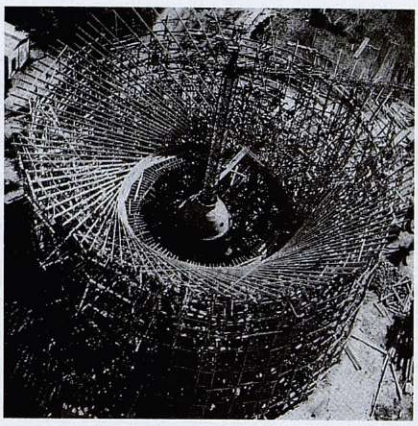
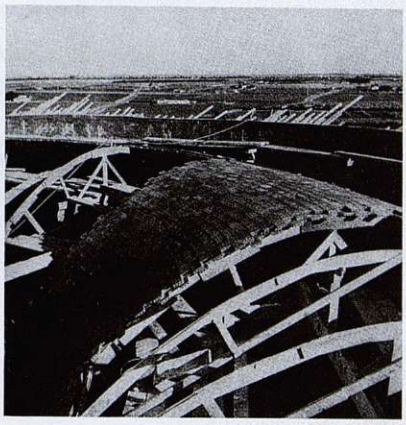
(F. 92 b)

© Avery Architectural and Fine Arts Library. Columbia University

(F. 92 a, b)

Los encofrados de madera de Félix Candela

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 93 a, b, c)

Depósito de Fedala, 1957
Eduardo Torroja

de tratarse de una cubierta de grandes luces, los tiempos habían cambiado, y no sólo existían otras alternativas evolucionadas y competitivas, sino que además las estructuras laminares de hormigón habían perdido, en gran medida, su razón de ser, fundamentalmente por el hecho de no ser ya la opción más económica.

Es un hecho que todos los grandes maestros que protagonizaron esta historia, además de optimizar la forma resistente de sus estructuras laminares, agudizaron su ingenio para optimizar también su coste de ejecución, haciendo así posible la prolífera construcción del patrimonio legado. Por esta razón, cada uno de ellos adecuó sus formas resistentes y procesos constructivos a las características específicas del momento y lugar donde las construyeron. Pier Luigi Nervi utilizó en Italia sistemas mixtos, empleando piezas prefabricadas ejecutadas a pie de obra, que servían de encofrado colaborante de sus estructuras laminares. Anton Tedesco, en 1934, a su llegada a los Estados Unidos, adecuó la patente del sistema Zeiss-D+W a la construcción americana, utilizando el encofrado tradicional. Eduardo Torroja utilizó diferentes tipos de encofrados, pero dado el alto coste de la madera en España empleó muy frecuentemente la fábrica de ladrillo como estructura laminar, dada la gran tradición española, y por ello su conocimiento por parte de los obreros. En el famoso Depósito de Fedala (1957), Eduardo Torroja realizó un tipo diferente de construcción para cada una de sus partes, con el fin de optimizar su coste en función de las diferentes formas geométricas utilizadas. Por ello, ejecutó una bóveda tabicada de fábrica de ladrillo de tres hojas como bóveda laminar tórica del depósito, y sin embargo un encofrado de madera en el fuste del depósito (paraboloide hiperbólico) (F. 93).

En sus cascarones, Félix Candela utilizó geometrías regladas, como el paraboloide hiperbólico, para optimizar el coste de ejecución, realizando encofrados a base de tablas de madera, ya que en México la mano de obra en los años 50 era muy barata, y las inexistentes reglamentaciones de medidas de seguridad permitían convertir la construcción en una aventura para diestros y audaces obreros. A mediados de los años sesenta, la subida de salarios en México fue el desencadenante de la subida de costes de ejecución de los cascarones. En general, en todos los países civilizados, el trabajo artesanal inició el camino del encarecimiento, y con él la merma de competitividad de las laboriosas ejecuciones de las *Thin Concrete Shells*, que en muchos lugares se empezaron a construir con módulos prefabricados. En España, también las tradicionales bóvedas tabicadas de fábrica de ladrillo iniciaron lentamente su desaparición, dejando atrás una historia llena de relevantes y paradigmáticas obras, ejecutadas, entre otros muchos, por Eduardo Torroja, Luis Moya e Ildefonso Sánchez del Río y Pisón.

Muchos años después, Félix Candela, durante su colaboración en Madrid con la empresa TYPSA (1980-1990), construyó en la Universidad Islámica de Riyadh algunos de sus "paraguas" de hormigón armado, pero la gran cubierta del estadio deportivo de la universidad la realizó con estructura metálica. Posteriormente colaboró en la construcción de la Ciudad de las Artes de Valencia, donde se construyó una réplica de su famosa estructura laminar del Restaurante de Xochimilco. Pero ya nada era igual. La aventura laminar de las *Thin Concrete Shells* de la arquitectura moderna hacía ya mucho tiempo que había terminado.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Referencias

[1] *Exposition Universelle des produits de l'Agriculture, de l'Industrie et des Beaux-Arts de París, 1855* (Exposición Universal de los productos de la agricultura, de la industria y las Bellas Artes de París, 15 mayo-15 noviembre 1855).

[2] La primera vez que apareció publicada esta frase fue en el poema *Andrea del Sarto* de Robert Browning, en 1855.

[3] Candela F.: *En defensa del formalismo y otros escritos*, Xarait Ediciones, 1985.

[4] IASS boletines periódicos desde 1959 (*Bulletin*). Secretaría: Laboratorio Central Madrid (CEDEX), secretario actual Rafael Astudillo.

[5] Picon A.: *L'art de l'ingénieur*, Éditions du Centre Georges Pompidou, París, 1997, p. 89.

[6] Joedicke J.: *Les Structures en Volles et Coques*, Vicent Fréal et cie. éditeurs, París, 1962, p. 14.

[7] Patente nº 415395, Reichspatentamt 1922, Firma Carl Zeiss in Jena.

[8] Torroja E.: *The Structures of Eduardo Torroja*, Ministerio de Fomento, Madrid, 2000.

[9] El primer CIAM, Congreso Internacional de Arquitectura Moderna (Congrès International d'Architecture Moderne), se celebró en el castillo de La Sarraz en 1928. En el año 1959 fue disuelto.

[10] Billington D.: *Robert Maillart and the Art of Reinforced Concrete*, Architectural History Foundation, 1991

[11] Bill M.: *Robert Maillart. Bridges and Constructions*, Verlag für Architektur, Zúrich, 1949.

[12] Abram J.: *L'architecture moderne en France de 1889*, (Tomo 2), Editions Picard, París, 1999.

[13] Joedicke J.: *Les Structures en Volles et Coques*, Vicent Fréal et cie. éditeurs, París, 1962, p. 15.

[14] Bulletin annual AFPC 1976-1977, pp.31-34.

[15] Sommer D.: *Ove Arup & Partners*, Birkhäuser-Verlag, Basilea, 1994.

[16] Candela F.: *En defensa del formalismo y otros escritos*, Xarait Ediciones, 1985, pp. 57-64 ("El escándalo de la Ópera de Sidney").

[17] Candela F.: *En defensa del formalismo y otros escritos*, Xarait Ediciones, 1985, pp 151- 152 ("En los setenta años de Ove Arup").

[18] El Instituto fundado por Eduardo Torroja en 1934, fue la primera organización creada en España "libremente" por particulares, con una finalidad mucho más ambiciosa que la recogida en el Real Decreto de 1889: "Investigar, Promover y Divulgar, sobre todos los campos relacionados con la construcción". Sus fundadores fueron Modesto López Otero, Alfonso Peña, Gaspar Blein, Manuel Sánchez Arcas, José María Aguirre, José Ángel Petrirena y Eduardo Torroja.

[19] Archivo del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Memoria año 1959.

[20] Universidad Politécnica de Madrid, Acto de investidura de Félix Candela como Doctor Honoris Causa, 1994.

[21] Nervi P.L.: *P.L. Nervi*, Verlag Arthur Niggli, Teufen (Suiza), 1957.

[22] Huxtable A.L.: *Pier Luigi Nervi*, Braziller, 1960.

[23] Candela F.: *En defensa del formalismo y otros escritos*, Xarait Ediciones. 1985, pp. 155-162 ("La Obra de Pier Luigi Nervi").

[24] Weingardt R.G.: *Anton Tedesco: Father of Thin-Shell Concrete Construction in America*, Publication of NCSEA.

[25] Schlaich J.: "Anton Tedesko", *Beton und Stahlbetonbau*, May 1993, n. 5, v. 88. Ver también "Anton Tedesko and the early history of concrete shells", *Journal of the International Association for Shell Structures*, December 1994, n. 3, v. 35.

[26] Stiglat K.: *Bauingenieure und ihr Werk*, Ernst & Sohn, Berlín, 2004, p. 147.

[27] Hines E.M., Billington D.: "Anton Tedesco and the introduction of Thin Shell Concrete Roof in the United Estates", *Journal of Structural Engineering* ASCE, November 2004, p. 7.

[28] Cassinello P.: "Design and Stability of Gothic Architecture", Cuadernos INTEMAC n. 53, 2004.

[29] Paduart A.: *Les voiles minces en béton armé*, Presses universitaires de Bruxelles, Eyrolles éditeur, Bruselas, 1969.

[30] Nogue N.: "Archives d'ingénieurs: Bernard Laffaille", *Colonnes*, May 2002, n. 18.

[31] Faber C.: *Las estructuras de Candela*, Trad. Miguel Echegaray, Compañía editorial Continental S.A., 1970.

[32] Billington D.: *The Tower and the Bridge. The New Art of Structural Engineering*, Princeton University Press, 1983.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

[33] Candela F.: *En defensa del formalismo y otros escritos*, Xarait Ediciones, 1985, p. 169.

[34] Faber C.: *Las estructuras de Candela*, Trad. Miguel Echegaray, Compañía editorial Continental s.a., 1970.

[35] Calavera J.: "La intuición y el cálculo en Félix Candela y algunos recuerdos", Centenario Félix Candela.

[36] Faber C.: *Las estructuras de Candela*, Trad. Miguel Echegaray, Compañía editorial Continental s.a., 1970.

[37] Joedicke J.: *Les Structures en Volles et Coques*, Vicent Fréal et cie. éditeurs, París, 1962, p. 13.

[38] Draper P., Garlock M., Billington D.: "Optimization of concrete hyperbolic paraboloid umbrella shells", Proceedings of the 6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures, iass-iacm 2008.

[39] Cassinello P.: "The Siprit of an Idea in Print", Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Consejo Superior de Investigaciones Científicas csic, amiet, Madrid, 2008.

[40] Cassinello P.: "En memoria de Heinz Hossdorf", *Informes de la Construcción*, v. 58, n. 502, 2006. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, csic.

[41] Faber C.: *Las estructuras de Candela*, Trad. Miguel Echegaray, Compañía editorial Continental s.a., 1970.

[42] Otto F.: *Cubiertas Colgantes*, Editorial Labor, 1962, pp. 91-96.

[43] Benito C., Del Pozo F.: "Algunas Estructuras de la Exposición Internacional de Bruselas", *Revista de Obras Públicas, n.* 106, 1958.

[44] Faber C.: *Las estructuras de Candela*, Trad. Miguel Echegaray, Compañía editorial Continental s.a., 1970.

[45] Cassinello F.: *Hormigonería*, Editorial Rueda, Madrid, 1974.

[46] Hossdorf H.: *Das Erlebnis Ingenieur zu sein*, Birkhäuser, 2003.

[47] Segal E., Garlock M., Billington D.: "A Comparative Analysis of the Bacardi Rum Factory and the Lambert-St. Louis Airport Terminal", Proceedings of the International Symposium iass-slte 2008, Acapulco, Mexico, October 27-31.

[48] Draper P., Garlock M., Billington D.: "Finite Element Analysis of Félix Candela's Chapel of Lomas De Cuernavaca", *Journal of Architectural Engineering*, 14(2), pp. 47-52.

[49] Desideri P., Nervi jr. P., Positano G.: *Pier Luigi Nervi*, Gustavo Gili, Barcelona, 1982.

[50] Esquillan N.: "Palais du CNIT: Couverture [1]", *Travaux*, n. 296, 1959.

[51] Paduart A.: "Design and Construction of the Civil Engineering 'Arrow' at the Brussels International Exhibition", *Journal of the American Concrete Institute*, n. 7, v. 57, 1 juillet 1960.

[52] Kretschmer W.: *Geschichte der Weltausstellungen*, Campus-Verlag, Frankfurt, 1999.

[53] Memoria año 1959, Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento csic, Fundación de la iass.

[54] "Morfogénesis de una lámina de hormigón. Escenario al aire libre en el ietcc. Autores: Fernando Cassinello, José Antonio Torroja, Francisco Morán, Ricardo Fernández", *Informes de la Construcción* n. 214, octubre 1969.

[55] Cassinello P.: "Arquitectura e ingeniería en la obra de Heinz Hossdorf", *RC*, n. 1, marzo 1997.

[56] Oliva Salinas J.G.: "Ulrich Müther (1934-2007). El maestro constructor de la provincia de Rügen", *Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas 2009*, n. 90, pp. 273-284.

[57] A petición de Fritz Leonhardt, en 1964, Frei Otto fundó el Institut für leichte Flächentragwerke (Instituto de Estructuras Ligeras), en la universidad de Stuttgart.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Thin Concrete Shells and other Light-Weight Double-Curved Structures

Mike Schlaich

Managing Director of Schlaich Bergermann and Partner
Professor for Conceptual and Structural Design - Structural Concrete
at the Technische Universität Berlin, Germany

A Personal Tribute to the Work of Felix Candela

Introduction

Felix Candela would have had his 100th birthday in 2010. On this occasion I feel honoured to have been invited to express my thoughts on someone I unfortunately never had the pleasure of meeting personally. However, I consider Candela as one of the greatest "Baumeister" of the 20th century, a man whose work still impresses me every time I look at it. I have a strong feeling of empathy for his thin concrete shells, their extreme lightness and elegance and their extraordinary ability to stimulate the mind. I am impressed not only by the large number of structures Felix Candela built but also by the variety of forms he developed. (F. 1) In his field of work he is a real "Maestro de obra," a "Baumeister," a master builder!

Trained as an architect Candela ingeniously combined the abilities of an architect, engineer and contractor all in one person. He developed a holistic approach to his work which resulted in structures which often come close to a "Gesamtkunstwerk." Reading his publications reveals not only Candela's deep affection for his profession and his profound knowledge of engineering but also a humble and frank personality which defined his structural gifts as "genio es 99% de trabajo abnegado y un 1% de inspiración."[1] [1, p.159]

So much has been written on the life and work of Felix Candela [2,3,4,5], for example on the individual structures he designed and the structural behaviour of shells that it would be superfluous for me to comment on it any further. I would rather like to use this opportunity to add some personal thoughts as someone who designs light-weight structures. For example, I wonder why today practically no concrete shells are being built anymore? What has changed since the days of Candela? Is there a future for concrete shells? Should they still be taught at University?

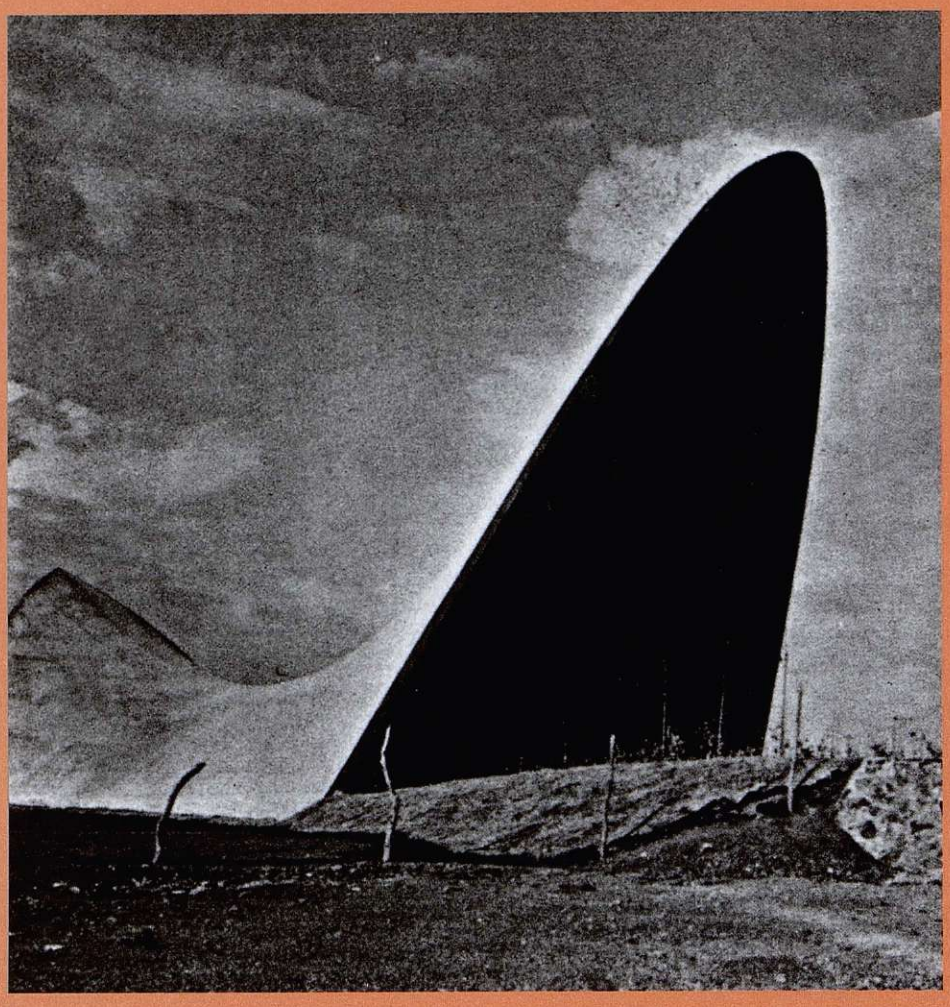
The Rise of Concrete Shells

For many years concrete shells have played a role in my professional life as I obtained the University chair that once belonged to the famous German shell builder Franz Dischinger. Already in the early 1920s he conceived and realised light-weight concrete shells and became famous for the Zeiss-Dywidag System he had developed together with Walter Bauersfeld especially for the roofs of planetariums. The first roof of this type was built in 1922 spanning 16m with just 3cm thickness. This structure triggered the success story of concrete shells. (F. 2) For his innovative theory on rotational shells Dischinger received a doctorate in 1928 from the *Technische Hochschule Dresden* and in 1933 he became a professor for Reinforced Concrete Structures at the *Technische Hochschule Berlin* – renamed after WWII as *Technische Universität Berlin* – where he stayed until 1951. Köpke and Specht were his immediate successors. Today we call it chair for Conceptual and Structural Design and we still teach concrete structures including shells.

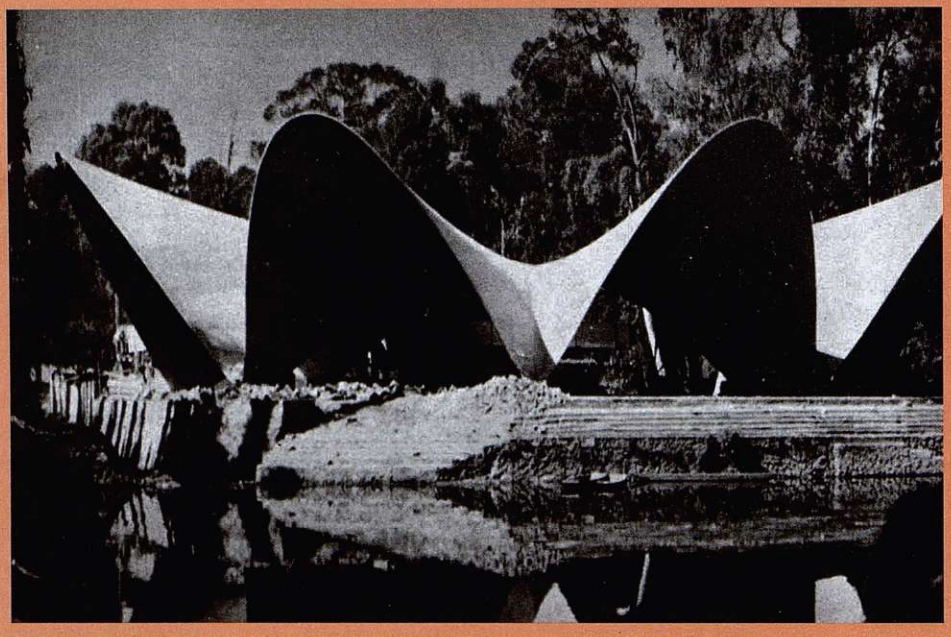
In 1935 Felix Candela received a grant to study shells with Dischinger and Finsterwalder in Germany. The essay that won him the scholarship was called "Influence of the New Techniques

[1] "Genius is 99% perspiration, 1% inspiration."

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 1)



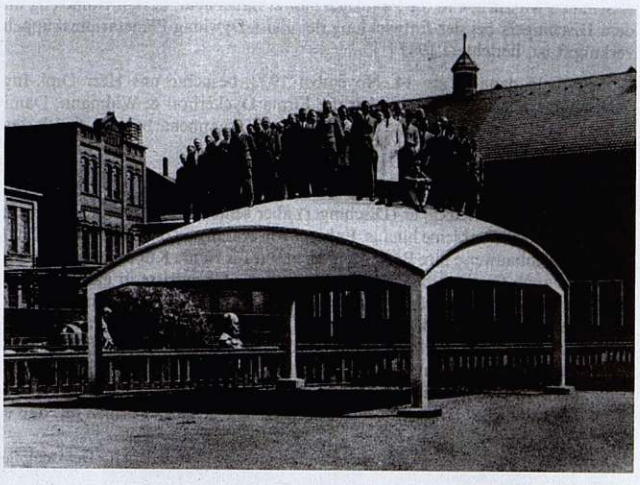
(F. 20)

(F. 1)
Capilla abierta, Lomas de Cuernavaca, Palmira, Mexico, 1958
(F. 20)
Restaurant in Xochimilco, Mexico, 1957

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

(F. 2)

Test shell by Dischinger and Finsterwalder, 1931. The shell still exists today at Wiesbaden-Erbesheim, Germany [6]



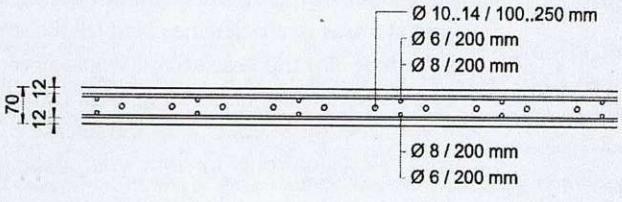
of Reinforced Concrete in Plastic Architecture." [4, p.56] However, the Spanish Civil War began the very day Candela wanted to leave for Germany. We can only speculate what would have happened if such different personalities like Dischinger and Candela had met. Dischinger's credo was "form follows formula" and Candela had stated that "what we need is a structure and not analysis." But instead of departing for Germany Candela decided to fight for the Republicans. Even though Candela did not go to Germany until after WWII he certainly had an influence on the shell builders of Northern Europe. Two of the most recent representatives – and, therefore, they are best known to me – are Heinz Isler from Switzerland and Ulrich Müther from Germany who both expressed their admiration for the work of Felix Candela many times.

Ulrich Müther, very much like Candela himself, was a designer and a contractor at the same time. Müther was the son of an architect and contractor on the Island of Rügen in the Baltic Sea. He took on his father's business even when the then East German government nationalised private industry. Müther's first shell in 1963 was already directly influenced by Candela whose ideas were transmitted to him by the architect Ingo Schönrock who had heard the lectures Candela had given in East Germany [8]. In a peculiar way the precarious economic conditions of East Germany favoured shell construction: Under the East German socialist regime labour was cheap and material was not. During the next twenty years Müther built about fifty shell structures, most of them in East Germany and many on the Island of Rügen. Therefore, a visit to the island is a wonderful trip into the world of thin concrete shells.

Most of Müther's structures are hypar shells which differ from Candela's approach only in so far as they have five layers of reinforcement even in shells of only 7cm thickness. (F. 3) This leads to an increased robustness with only about 10 kg/m² of reinforcement. Similar to Dischinger's roofs that avoided expensive formwork Müther also experimented with sprayed (gunite) concrete using wire mesh combined with bar reinforcement.

(F. 3)

Five layers of reinforcement on a 7 cm thick shell, Magdeburg, Germany [8]



Müther's best known structure is the so called "Teapot" in Warnemünde, close to the city of Rostock. (F. 4) It is made of three hypar shells spanning more than 25 m with 7cm thick shells and free edges. Built in 1968 it served as a café and became the symbol of the fashionable seaside resort. After the German reunification the building stood empty for years but eventually Müther was commissioned to refurbish it. Today it is again fully used as a café even though unfortunately partition walls obstruct the free space that shells can offer. In 2002 I met Ulrich Müther on site supervising the refurbishment and he took on a pragmatic point of view regarding the loss of the inner free space for the sake of the shell's survival. Still from the outside it

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 4)
The "Teapot," Warnemünde, Germany, 1968



has retained its elegance. Before this encounter at Warnemünde I had already met this gentle-mannered builder several times during the late 1970s when I was still a boy. I then accompanied my father Jörg Schlaich who visited Müther regularly in East Germany. Müther built his last shell, the Berlin Planetarium, in 1986. He died in 2007 and has no successor.

The last one of the classic shell builders, the Swiss engineer Heinz Isler, went still further in the art of shell construction. [9] He also admitted that as a young engineer he had admired Candela. Isler called Candela "for his time the master builder of shell structures," even though in the same article he also considers Pier Luigi Nervi as the "master of shell structures." [5, p.89] Contrary to Candela's Mexico and Müther's East Germany labour is expensive in Switzerland. Though Isler's design was also driven by the strife for beauty and lightness he had to find other ways to economise to those of his colleagues. He claims to have got his inspirations by "making observations." (F. 5) The shape of pillows led him to experiment with pneumatically inflated formwork and the sight of "wet burlap cloth hanging in the tension of wire mesh" produced the idea of building free-form compression-only shells by using the inverted hanging shapes of wet cloth. [5]

During the 1980s I studied at the ETH in Zurich under Bruno Thürlimann, Christian Menn and Hugo Bachmann, but one of the most impressive lectures was delivered by Heinz Isler. He showed us pictures of wet cloth he had placed in his garden during winter time where they froze over night and then the next morning he turned them upside down to work like compression-only shells. Still a student I met Isler at my parent's house where he told me that while calculations were helpful, more important was an understanding of structural behaviour. Just by looking at a wall or a ceiling he could tell the stresses acting there. I was most impressed but at the same time also frightened that I would never be able to tell stresses by just looking at a structure. Today I understand that he meant something similar to Candela's 99% "trabajo abnegado." If you work on a subject long and intense enough you just know about its properties and you need calculations only to verify your assumptions.

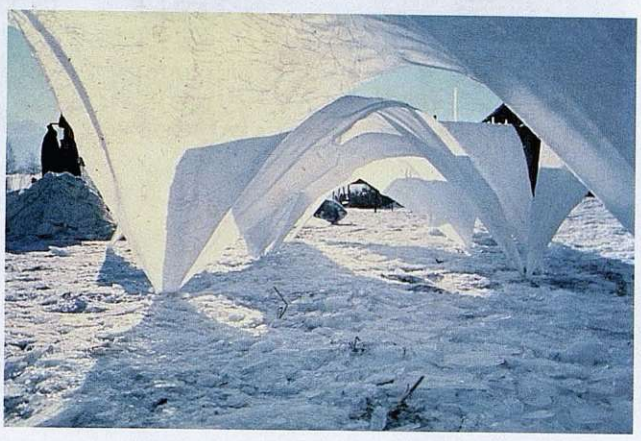
Isler's free-form shells, are derived from inflated or hanging membrane models, which were carefully measured and translated into the real buildings. This method and the idea of building expensive but reusable formwork became a real success story with hundreds of shells being built all over Switzerland. Most of them still exist and are easy to find. Perhaps Isler's most elegant structure is the two point supported shells that cover a petrol station at Deitingen on the Bern-Zurich motorway. (F. 6) Heinz Isler died this year on 20th June and with that the last of the great shell builder has left us.

Needless to say that there were also further concrete shell builders in northern Europe and in their work we can also detect Candela's influence. For example, the 90 m-span roof that covers

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 5 a, b)
Ice Structures by Heinz Isler





the swimming pool at Sechslingspforte in Hamburg, Germany, (1967) is composed of two hypar shells. It bears a strong resemblance to the much smaller shell at the Beach Club Playa Azul built by Candela in Venezuela, 1958. (F. 7, 8)

The Decline of Concrete Shells

Nearly all thin concrete or masonry shells all around the world – and there are hundreds of them – were built in the period from 1925 to 1975. Most of them come from the following nine engineers or architects: Eduardo Torroja (1899-1961) and Felix Candela (1910-1997) from Spain; Robert Maillart (1872-1940) and Heinz Isler (1926-2009) from Switzerland; Franz Dischinger (1887-1953) and Ulrich Müther (1934-2007) from Germany; and Anton Tedesko (1904-1994) and Eladio Dieste (1917-2000) from the Americas. All of these great engineers and architects have now passed away and with them the art of concrete shells has disappeared.

In a sense however, this is not entirely true, since concrete cooling towers are really very slender shells and they are still being built today to a height of 200m. Most concrete silos are composed of cylindrical and conical shells. Still these utilitarian structures and their repetitive shapes represent only a fraction of the range that used by the previous generation of shells. Factories, warehouses, metro stops, grandstands, theatres, cinemas, churches, restaurants, bars and even houses used to be covered by shells.

All this came to an end more than thirty years ago and Felix Candela appears to have been the one whose work was affected the most. Of all the names in this field he was probably the most specialised, concentrating on concrete shells, most of them hyperbolic paraboloids. Candela became the master of concrete shells and he went down with them when shell building declined. At a lecture at the Universidad Nacional Autonoma de Mexico in 1969 he admits with brutal openness [1, p.138]: "... La verdad es que yo estoy tan perdido y desorientado como ustedes. Tengo cerca de 60 años, me he pasado 20 de ellos como constructor y diseñador de estructuras, conozco el oficio de arquitecto tradicional razonablemente bien, y no encuentro mercado

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 6)

BP Petrol Station, Deitingen, Switzerland, 1968



ni uso para unas habilidades que me ha costado muchos años conseguir. Soy una persona desplazada en el mundo actual y no sé lo que hacer ni si valgo para algo."[2] It is sad to hear such a famous and successful man in despair but to me it also proves what a great man Candela really was. He was not afraid of being open about his feelings even though they exposed his weaknesses.

I can imagine that all of the shell builders mentioned above had strong personalities and working with them must have been a real challenge. Still, so many young architects and engineers must have studied and worked with them that they could have easily continued the tradition of building shells. There must have been other reasons for concrete shells to have disappeared so rapidly. The following reasons come to mind:

1. Shells are out of fashion: It was the freedom of shape offered by the new construction material of reinforced concrete that led to new and spectacular forms in the 1920s and 1930s. Curved, natural looking shell shapes became fashionable again after WWII during the Fifties and Sixties. Perhaps they were a reaction to the boxes and rectangular shapes pertinent to Modern Architecture as influenced by the Bauhaus, Gropius, Mies van der Rohe, Le Corbusier etc. Once the hippy era of the Sixties ended polygonal shapes took over again and the demand for shells decreased.

2. Shells are expensive: Fashion and technical issues apart, it is cost that determines the feasibility of a building or a structure. The complex, mostly double curved shapes of shells require complex and labour intensive formwork. Even in the developing countries labour became more and more expensive. Thus shells could not be built economically anymore and anywhere. Of course, to a certain extent cost can be reduced by inflatable formwork, repetitive use of the same formwork or, especially in the case of Candela, the use of hypar shells where the formwork can be arranged along the straight generator lines of the shell, i.e. made of straight bars. Nevertheless, the formwork and its supports make shells costly.

3. Shells are not practical: Candela, Isler and most of the other shell builders argue that since nature does not create plane structures and hardly any rectangles, double-curved and organically shaped shells are not only efficient but more natural than other structures. But the attribute "natural" is not equivalent to "practical." In terms of partition walls, installations, lighting, furniture, windows etc. plane walls and ceilings are more practical.

4. Shells are difficult to analyse: Until recently only selected shell shapes such as rotationally symmetrical shells under symmetrical loading, cylindrical vaults and hypar shells could be analysed "by hand" with certain accuracy. For all other cases the fourth order partial diffe-

[2] "As a matter of fact, I am as lost and disorientated as you are. I am around 60 years old and 20 of them I spent as contractor and designer of structures, I know the trade of the traditional architect reasonably well and I neither find market nor use for some capabilities that cost me so much to achieve. I am out of place in today's world and I do not know what to do nor if I am worth anything."

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

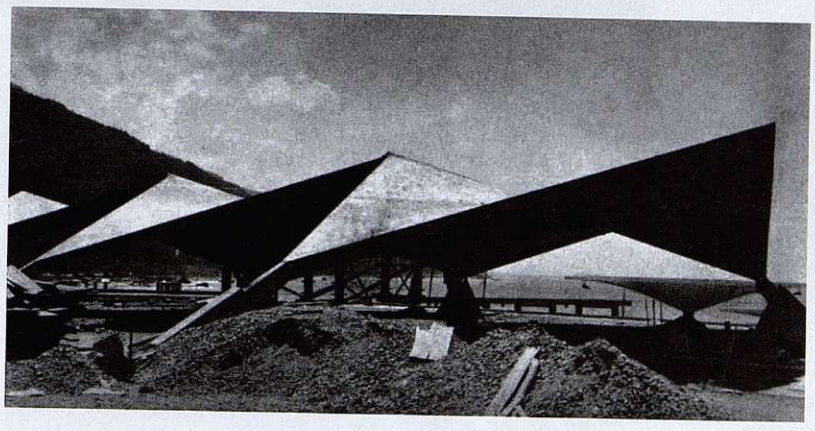
(F. 7)

The Hypar Shell at Hamburg Sechslingspforte, under construction, Germany, 1967



(F. 8)

The Hypar Shell at Hamburg Sechslingspforte, under construction, Germany, 1967



rential equations that needed to be solved made hand calculations too complex and model testing was the only way out. Thin concrete shells in compression are also prone to instabilities. They may buckle if there is not sufficient double curvature and also dynamic effects such as vibrations due to wind can lead to failure. It appears that those who understood the membrane and bending theory of shells were not always able to translate their theory so that it could be understood by practitioners. Candela writes with certain irony: "es un fenómeno general en la literatura técnica que trata de estos temas que sus autores se muestran excesivamente generosos en lo que se refiere a integrales y ecuaciones diferenciales complicadas, sobre todo cuando su manejo no se halla al alcance de la mayoría y procuren, en cambio, ocultar celosamente los principios mecánicos en que se basan los procedimientos analíticos. De este modo se has mantenido eficazmente, durante muchos años, un velo de misterio sobre estas cuestiones, rodeándolas de una aureola de alta especulación matemática, que contribuye a presentar a los escasos iniciados como sabios eminentes y a ahuyentar a los atrevidos que intentan introducirse en su reducico círculo."[3] [1, p.98]

5. Shells are dark: While concrete shells are thin and lightweight, the proper building material is opaque and does not permit light to enter the space below. If natural light is required, openings have to be inserted into the shell, which makes them even more difficult to analyse.

6. Shells are not compatible with modern building physics: Good thermal insulation is becoming more and more important. Thin concrete shells provide no thermal insulation and, the-

[3] "In the technical literature that treats these subjects it is a general phenomena that the authors are excessively generous with complicated integrals and differential equations, especially when dealing with them is not within reach for the majority and on the other side they are jealously hiding the mechanical principles of the analytical procedures on which they are based. For many years these questions were effectively covered by the veil of mystery, surrounded by an aureole of high mathematics that presented the few who understood as scholars and chased away the few brave ones who dared try to enter their narrow circle."

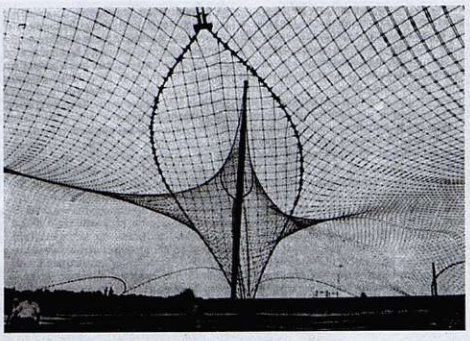
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 9)

German Expo Pavilion by Frei Otto, Montreal, 1967

(F. 10)

Roof of the Olympic Stadium, Munich, 1972





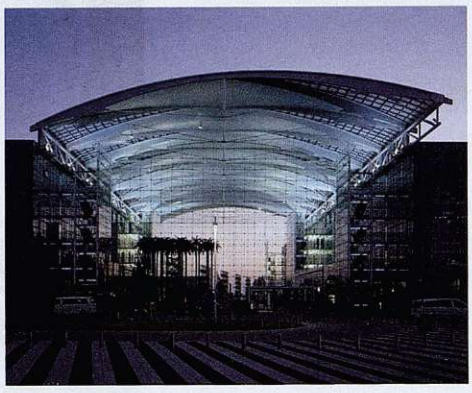
(F. 11)

Cable-net Cooling tower during construction without cladding, Schmehausen, Germany, 1974 [12]

(F. 12)

The First Cable-Net Glass Façade, Hotel Kempinski, Munich, 1993





refore, in the northern countries they need to be clad with additional insulation material which in turn eliminates their slenderness. This is often the very reason that they were built in the first place.

7. Shells are not covered by building codes: Thin shells are uncommon structures with uncommon dimensions and uncommon structural behaviour. The more codes and rules we have, the more difficult it is to prove that a shell is acceptable. To quote Felix Candela again: "La oposición de la burocracia tecnológica, tanto estatal como la de la gran industria, e inclusive la de muchas sociedades científicas, es una de las más efectivas barreras que el hombre ha ideado contra el progreso."[4] [1. p.162]

8. Shells only make sense for small structures: In terms of size Candela was convinced that spans of more than 30 m are not economical. As a matter of fact, thin concrete shells are rarely seen for stadium covers, a hangar or large expo halls.

Even though some of the items listed above may not be of any great importance, the totality of them certainly prevented concrete shells from evolving any further. The history of structures is also the history of building materials and in the Sixties, for example, new high-strength steel wires and new membrane materials made of plastic fibres suddenly became available.

The Next Generation Light-Weight Structures

The German Pavilion built for the 1967 World Expo in Montreal by Frei Otto, with the architect Rolf Gutbrodt and the engineers Leonhardt and Andrä, is the iconic building which represents the next generation of light-weight structures. [10] With the help of the new materials now available Frei Otto and his team created shapes never seen before. Tent-like tension structures made of cable-nets covered by membranes became possible. With their double curvature they seem to originate directly from Candela's hypar shells. The big difference, however, is that they are pre-tensioned tensile structures and their stiffness and stability is achieved by combining double curvature with a high level of pre-stress. Contrary to their concrete ancestors these new

[4] "The opposition of the technocratic bureaucracy be it from the government, from the multinational firms and even from the scientific community is one of the most effective barriers against progress mankind has come up with."

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 13)

Spoked Wheel Roof covering the Gottlieb Daimler Stadium, Stuttgart, Germany, 1993

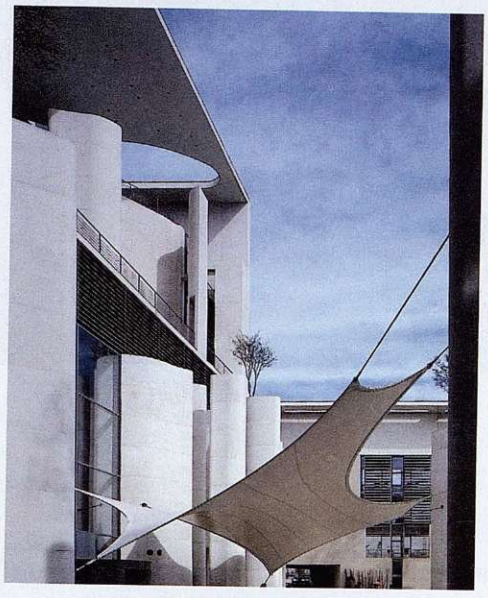


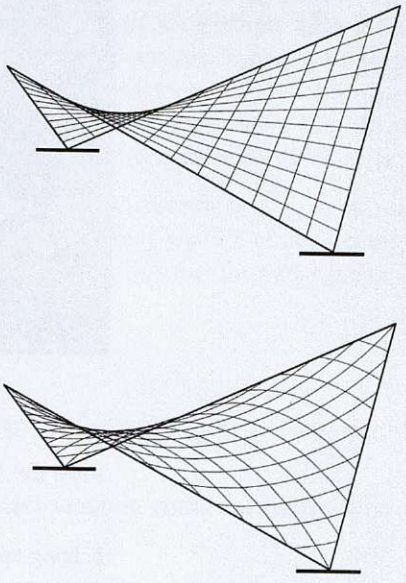
(F. 14)

Membrane Canopy, Chancellery, Berlin, Germany, 2001

(F. 15)

Hypar Shells made of Straight Generators (for concrete shells) and curved ones (for grid shells covered with plane quadrangular glass panels)





structures were so light that wind suction could carry them away. Therefore, it is important to note that these light-weight structures need bulky and costly foundations in order to anchor wind loads and the pre-stress forces into the ground.

Strongly influenced by the German Pavilion in Montreal the architect Günter Behnisch and the engineers Leonhardt und Andrä, together with Frei Otto, projected this experience on a much larger project. (F. 9) The result turned out to be the still impressive roof covering of the 1972 Munich Olympic stadium. (F. 10) The enormous size and elegance of this structure is the climax of cable-net building. [11] To my knowledge no larger roof of this size has been built since. At the same time the Munich roof demonstrates that such structures are very costly not only because the foundations are expensive but also because firstly, the net has to be built and secondly, the cladding has to be attached.

Today pure cable-net constructions are mainly successful as special purpose structures such as covers for aviaries and in cable-net façades. Of particular interest in this case is also a 180m high cooling tower that was built as a cable-net structure during the Eighties.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 16)

Glass Hypar Roof with plane quadrangular Glass Panels, Schubert Club Band, Minneapolis, EEUU, 2001



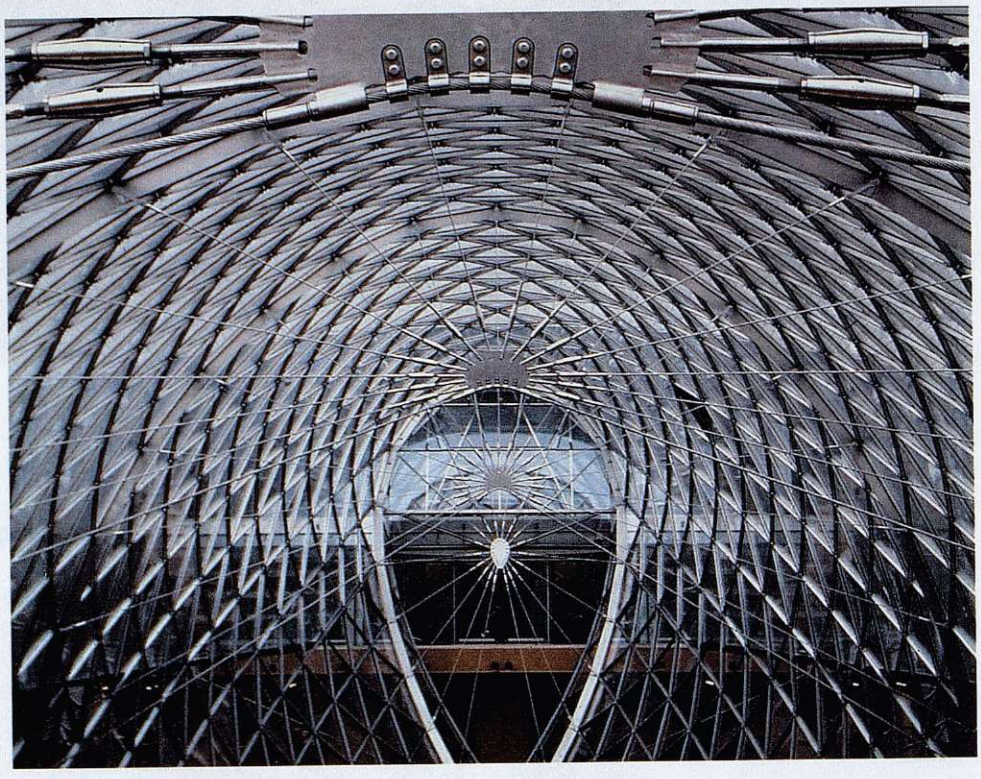
(F. 17)

Glass Grid Shells with plane quadrangular Glass Panels, Berlin, Main Station, 2006



(F. 18)

Triangular Steel Grid Shell, Roof of DZ Bank, Berlin, 1998



Since the 1980s two new tendencies have emerged, opening the way for a whole new generation of light-weight double curved structures:

1. Long-span membrane roofs, often self-anchored, with a minimum of primary steel structure. (F. 11)

2. Very transparent steel grid shells covered with glass. (F. 12)

Once again it was advances in material technologies, for example, high-strength membranes and affordable tempered safety glass that contributed to progress.

However, new structural systems such as spoked-wheel roofs and translational surface grids contributed greatly in paving the way for these advances. [12]

Nowadays double curved pre-tensioned membrane structures are amongst the most successful long-span light-weight roof structures. They are surprisingly economic provided they are self-anchored, i.e. the spoked wheel concept is used. Just in our office we have designed more than twenty stadia membrane roofs with a weight (dead load) of approximately 25 kg/m² that span areas of 200x300 m without interior supports and that can carry loads of 100 kg/m², i.e. around four times their own weight. (F. 13)

Light-weight steel grid shells covered with glass have the advantage that the lightness of the structure is fully visible. As long as the steel grid is composed of triangles (or rectangles with cable diagonals) the structure behaves exactly as a shell. (F. 14) If translational surfaces are used,

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 19 a, b)

Triangular Steel Grid Shell covering the "Palacio de Comunicaciones" in Madrid, Spain, 2008

plane glass panels can be used on a quadrangular steel grid which leads to rather economic structures. While Candela used to align the formwork for his concrete hypar shells along the straight generator lines, for glass covered shells curved generator lines are used in order to achieve plane glass rectangles. This interesting subject on its own is too ample to be pursued at this instance any further and the interested reader is referred to the respective publications. [13]

When the shape of a shell cannot be represented by translational surfaces as in (F. 15) – e.g. if a shell designed by Heinz Isler was to be made of glass – the only way left to develop the surface is to work with triangles. In this case a steel grid made of bars that form triangles covered in triangular glass panes works as a shell.

Today´s Freedom of Choice

As we have just explored, compared with Candela's age, we have many more options if we want to build light-weight structures:

- Predominantly in compression we can build not only concrete shells but also glass covered steel-grid shells.
- Predominantly in tension we can build cable nets and membrane roofs.

I am of the opinion that generally light-weight structures are very desirable. Not only do they minimise bending, i.e. use the structural sections in a most efficient way, they also convince for several other reasons:

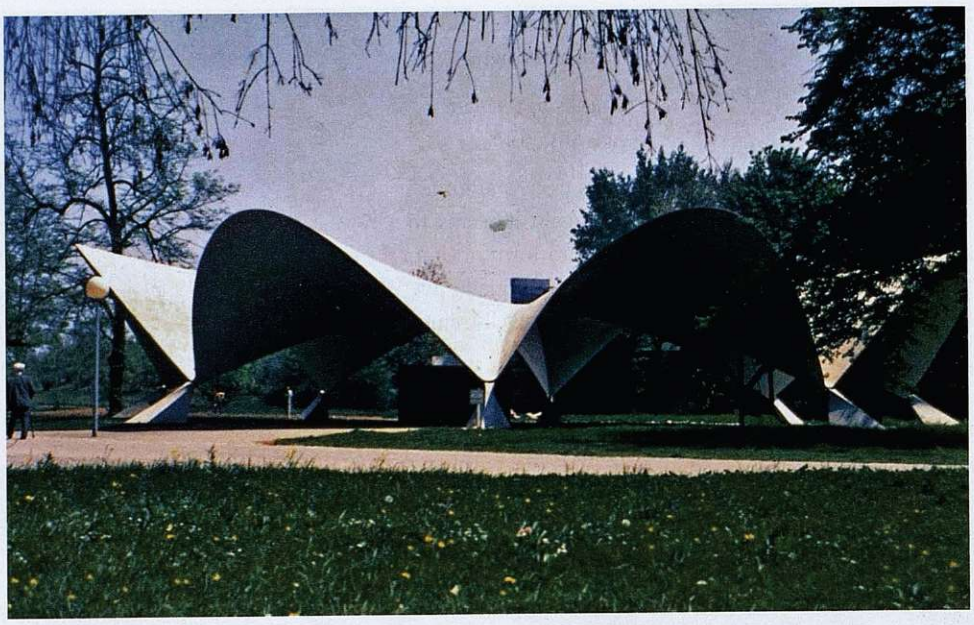
- Beauty: Light structures are transparent and show the flow of forces in a natural way. We generally like what we comprehend. We also prefer lightness because we associate with it elegance as lighter structures do not obstruct our view and we feel less threatened. (F. 16, 17, 18, 19)
- Ecology: Light structures generally require minimum quantities of material, hence they are sustainable.
- Social: Light structures are not easy to build. They require qualified manual labour. Therefore, they play a social role as they create jobs.

In my opinion, due to the plethora of choice in light-weight constructions today, they have become once again very fashionable. In contemporary architecture there is a trend towards natural shapes. Parallel to this development the possibilities of 3-D computer graphics have opened the way to more ephemeral designs and virtual structures. They are very convincing on the

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 21)

Shell roof of Glass Fibre Reinforced Concrete, Stuttgart, Germany, 1977



computer screen and, if at all, can only be transformed into reality with the help of shell type structures. Admittedly there is a danger in such trends. Forty years ago in his essay "Comentarios acerca de la colaboración entre arquitectos e ingenieros" [1] Candela complains about modern architects who design structures without knowing if they can be built. He equally complains about engineers who calculate everything the architects give them but do not contribute to the concept of the structures. How true is this still today! But we should not carry on complaining. This does not change anything. Rather, we should be optimistic and use the present trend to build light-weight double curved structures – shells – once again!

At the same time the evolution of structures in general is continuing thanks to progress in material science. Glass, for instance, is being glued together directly leading to all-glass structures without any supporting steel work. High strength carbon fibre materials are also being used more and more frequently and even in the field of concrete new tendencies appear, such as ultra-high-performance and infra-light-weight concretes as well as new fibre- and textile-reinforced concretes.

As engineers and as builders we have a great deal of responsibilities and, therefore, tend to advance carefully in order not to endanger lives when entering unknown territory. In 1994 Frei Otto contributed an essay to the exhibition catalogue celebrating Candela for receiving the title Dr. Honoris Causa in Madrid. [3] There he explicitly stated that he does not believe in a world-wide renaissance of concrete shells and states that mankind should not imitate what has been built before. Indirectly he criticised my father's "copy" of Candela's Xochimilco structure. (F. 20, 21) I disagree with Frei Otto. Jörg Schlaich built this temporary super light-weight structure, made of 12 mm thick fibre reinforced concrete, as a tribute to the master and at the same time experimented with a then new construction material. This "homage" combined with progress was legitimised by Candela himself when he visited the structure and seemed to like it very much. [5, p.143]

Let us come back to concrete shells as one of the structural options we have today. Do they have a future? Jörg Schlaich comes up with several reasons why we should still work with them today [14]:

- They are the most honest structures as shape and structure are identical.
- They are natural and beautiful if they are made to work without or almost without bending.
- The material concrete is genuinely used as shells work mainly in compression and use the sculptural formability of concrete to a maximum.

Furthermore, some of the arguments once raised against concrete shells are not valid anymore:

- Structural analysis has become easy.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

- With regard to building physics concrete shells can sometimes be even more advantageous than other light-weight structures if we consider noise protection and heat storage capacity.
- Thanks to CNC-guided machines organically free-shaped formwork is not prohibitively expensive anymore.

As this essay's argument points out, there seem to be growing opportunities for concrete shells. Once again it seems that light-weight structures, and with them thin concrete shells, have a chance to form an important part in the future of structures. Anyhow, for all future complex structures of quality we need "maestros de obra", well trained engineers who know about architecture and well trained architects who understand how structures work. Then I think we can be full of hope.

I am a structural engineer of almost fifty years of age. I admit that I have not really built a concrete shell, yet. I am constantly scanning our projects for a chance finally to build one. I also believe that the class on concrete shells I teach is very important for my students. I cannot stand at the blackboard and write down differential equations by heart for two hours as, so I am told, Franz Dischinger did. I confess this to only some embarrassment since in our age we have in the computer a much more powerful tool than the simple pencil-and-paper calculations available to Dischinger. Still, I think it is important to know the basics – for example, that a cylindrical shell behaves very much like a beam on elastic foundations when it is exposed to point loads. I want to ensure that when a student leaves the Technische Universität Berlin he knows how to verify the results of a computer calculation of shells roughly by hand. Thin shells and the other light-weight structures mentioned above continue to be a challenge for structural engineers. They are the most efficient type of structure and require the engineers' full attention. They will continue to be an important part in the world of structures. Thin concrete shells will come back one way or the other and, therefore, we must keep alive the knowledge accumulated by Felix Candela who belongs to the few who best mastered them.

References

[1] Candela F.: *En defensa del formalismo y otros escritos*, Xarait Ediciones, 1985 (in Spanish).

[2] Faber C.: *Candela, The Shell Builder*, Reinhold Edition, 1963.

[3] Segui M. (ed.): *Felix Candela, arquitecto*, Ministerio de Obras Publicas, Spain, 1994 (in Spanish).

[4] Garlock M., Billington D.: *Felix Candela, Engineer, Builder, Structural Artist*, Yale University Press, 2008.

[5] Nordensen G. (ed.): *The Felix Candela Lectures, Seven Structural Engineers*, The Museum of Modern Art, 2008.

[6] Specht M. (ed.): *Spannweite der Gedanken*, Zur 100. Wiederkehr des Geburtstages von Franz Dischinger, Springer-Verlag, 1987 (in German).

[7] Dechau W. (ed.): *Kühne Solitäre*, DVA, 2000 (in German).

[8] Weller B., Tasche M.: *Die Betonschalen von Ulrich Müther, Beton- und Stahlbetonbau 1004*, Heft 7, 2009 (in German).

[9] Ramm E., Schunk E.: *Heinz Isler Schalen*, Katalog zur Ausstellung, vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, 3. Auflage, 2002 (in German).

[10] Nerdinger W. (ed.): *Frei Otto, Das Gesamtwerk*, Birkhäuser, 2005 (in German).

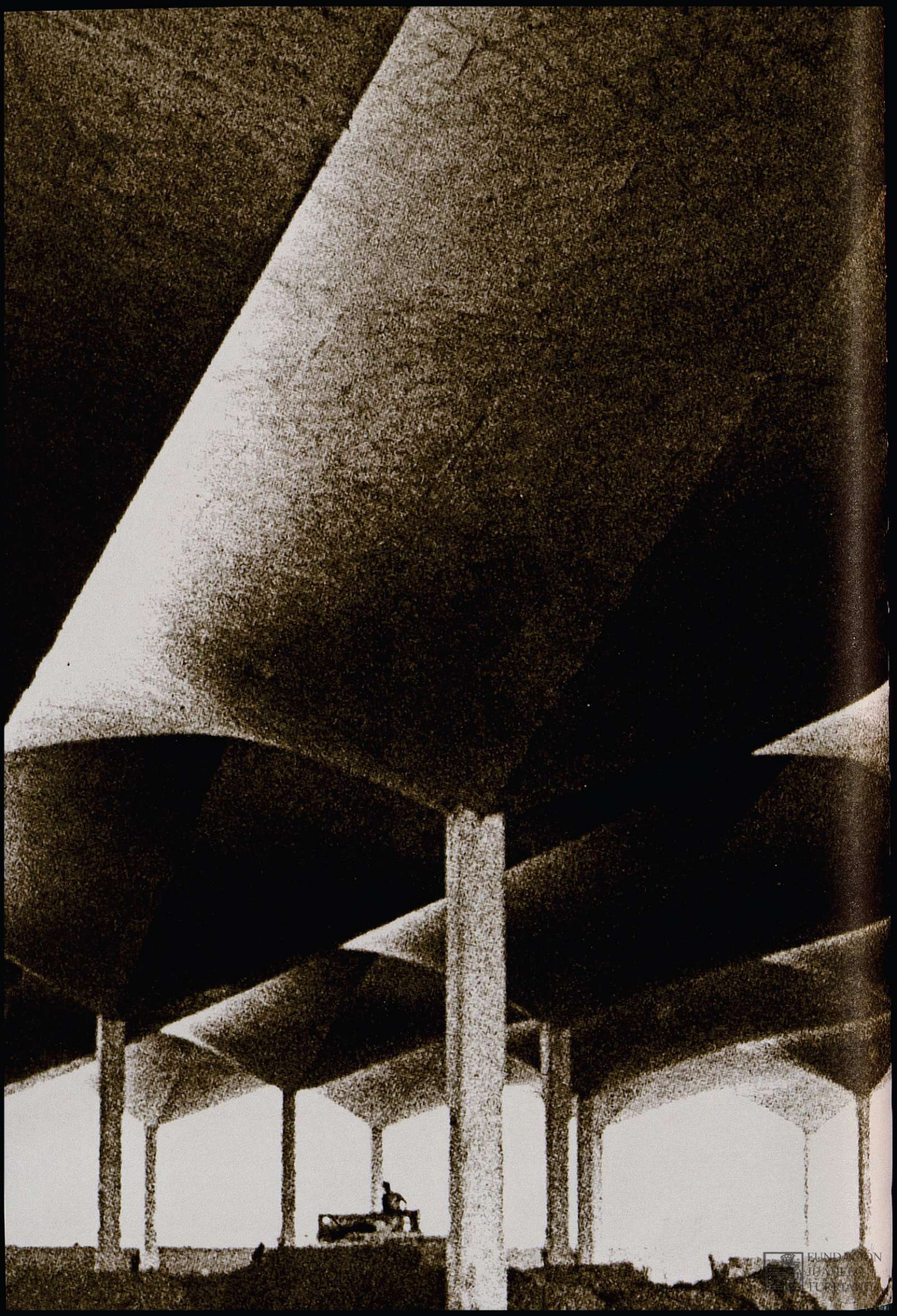
[11] Leonhardt F., Schlaich J.: *Vorgespannte Seilkonstruktion. Das Olympiadach in München*, Stahlbau, Hefte 9,10 and 12, 1972 (in German).

[12] Holgate A.: *The Art of Structural Engineering*, Edition Axel Menges, 1997.

[13] Schlaich J.; Schober H.: *Glass-covered light-weight spatial Structures*, IASS-ASCE International Symposium, Atlanta, 1994.

[14] Schlaich J.: *Do concrete shells have a future?*, IASS Bulletin N° 89, Spain, 1986.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



2 EL LEGADO DE FÉLIX CANDELA
FELIX CANDELA'S LEGACY

Felix Candela´s Legacy
MARIA EUGENIA MOREYRA GARLOCK, DAVID P. BILLINGTON

Félix Candela: su legado a México y al mundo
JUAN GERARDO OLIVA SALINAS

Felix Candela and the IASS
JOHN F. ABEL

Felix Candela: craftsman and precursor
of contemporary technologies of thin concrete
AGOSTINO CATALANO

Felix Candela, Pier Luigi Nervi
and the formalism in architecture
MASSIMILIANO SAVORRA

Félix Candela
ANTONIO LAMELA

Félix Candela
Colaboración con TYPSA en los años 80
PABLO BUENO

Almacén Celestino Fernández
Colonia Vallejo, México D.F., 1955

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Felix Candela's legacy

Maria Eugenia Moreyra Garlock, David P. Billington

Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering
Princeton University, Princeton, NJ, USA

Gordon Y.S. Wu Professor, Department of Civil and Environmental Engineering
Princeton University, Princeton, NJ, USA



John Gutmann © 1998 Arizona Board of Regents

(F. 1)
Felix Candela, 1910 – 1997

Introduction

Felix Candela (F. 1) was a world-renowned engineer, builder, and structural artist of thin-shell concrete-roof structures in the mid 20th century. Candela's works show three essential engineering ideas: the first is the true ethos of engineering, namely, the drive to conserve natural resources; the second is the ethic of engineering, to resist wasting money; and third, the aesthetic of engineering, to avoid the ugly. Candela's great concrete works show evidence of all three: thinness of shells, imprint of straight-line form boards, and grace in the refinement of form. This paper illustrates how Candela's works came into being, that is, the technical process by which they were built and the social process that made them possible to build in the first place. In all cases Candela was approached to be the builder – and then he proceeded to make his own engineering designs as well as calculations. The stimulus for the general plan sometimes came from somewhere else, and Candela played with it to make his own design and then create structural art. This art can only arise when that play is disciplined by efficiency and economy and when one has control of the three parts of design as Candela did: he engineered his designs, he built them, and he formed them to be elegant.

This paper is a brief summary of material contained in a textbook recently published by the authors. [8] The argument of structures as works of art is made visual not only in this heavily illustrated book on Candela, but also in a major exhibition centered on elegant scale models built by Princeton engineering undergraduates and graduate students who also researched and wrote chapters in the book. The exhibition (with the same title as the book) was in the Princeton University Art Museum (Oct. 11, 2008 to Feb. 22, 2009) and the MIT Museum (April 2 to September 27, 2009). Here we present Candela as both master builder and structural artist and provide definitions for both. We also show evidence of Candela as an engineer, builder and artist who arrived at the forms, but, contrary to popular belief, he was not practicing as an architect of his concrete shell works. This paper also provides brief descriptions of his significant structures and describes Candela's stimulus for their shape. Finally we conclude with the significance of Candela's legacy in education and practice.

Master Builder and Structural Artist

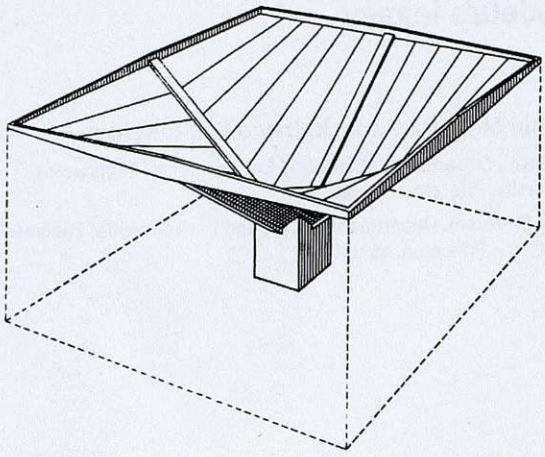
When a work of structural engineering is elegant, it is regularly described as architecture and the designer is called an architect. In the case of Candela, the confusion is understandable since he was

Felix Candela was a world-renowned engineer, builder, and structural artist of thin-shell concrete-roof structures in the mid 20th century. Although a native of Spain, his exile to Mexico at the end of the Spanish Civil War provided the New World locale in which he created all his major works. Through an examination of his self-proclaimed favorite structures (Miraculous Medal Church, Restaurant at Xochimilco, the Bacardi Rum factory, and the Chapel at Cuernavaca,) plus his first hyperbolic paraboloid shell (Cosmic Rays Laboratory) and his umbrella shells that comprised the bulk of his work, we give insight into Candela's ideas and genius. In this way the legacy of such structural artists provides an essential part of engineering education and of the means for greatly improving the practice of structural design.

International Association for Shell and Spatial Structures, IASS. Symposium 2009, Valencia. Book of abstracts.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 4 a)
Aimond's umbrella sketch



trained as an architect, but as our book and exhibition make clear, he practiced as one of the greatest structural engineers of the twentieth century, and hardly at all as an architect. Our evidence comes from his early career as an experimentalist, which prepared him to be a builder and a designer, his role as a builder and designer of his best works, and Candela's own words.

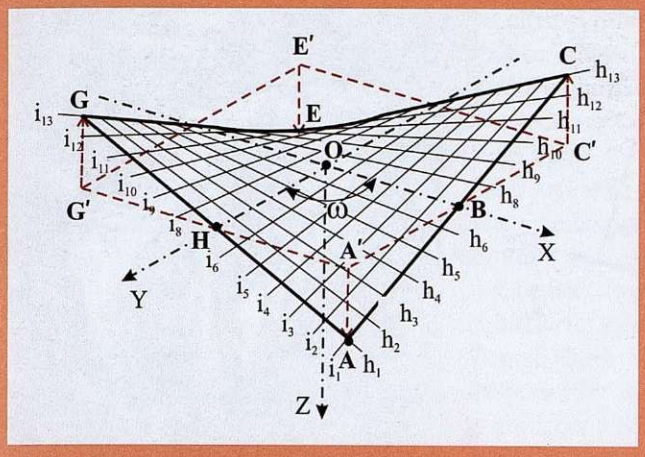
By the early 1950s, as Candela was gaining local fame in Mexico and architects were giving him contracts, he no longer worked as architect. He remarked at the time that "every day I feel less and less an 'architect;' I am losing interest in making plans and window details and things like that." [7] He identified himself more as an engineer and builder: "I must say... that although an architect by training, in practice I am a constructor and building contractor," [4] and one who makes his own engineering designs. This disassociation from thinking of himself as an architect was reflected even more pointedly in an essay he wrote for a symposium honoring Robert Maillart at Princeton University in 1972. The organizers who invited him to speak suggested "New Architecture" as a title for his paper. Candela began his paper and lecture saying, "The title of my lecture is 'New Architecture;' but I cannot avoid the feeling that I have not too much to do with this subject. I don't think I can speak of my work as of any new architecture or even as architecture at all." [5] Later, when Candela republished this paper in Spanish, he renamed it "La Herencia de Mailllart" (Maillart's legacy).

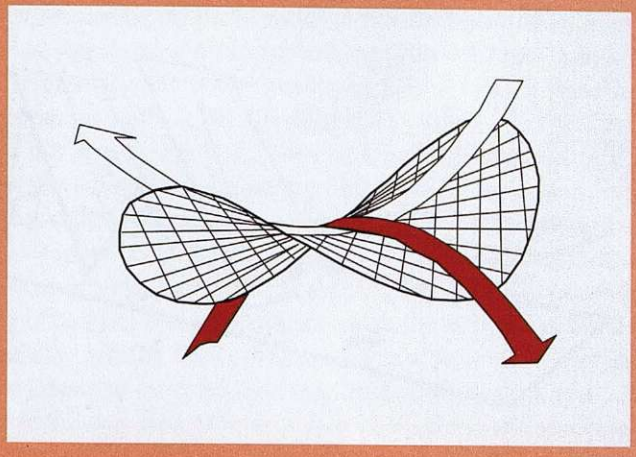
Modern master builders exhibit two characteristics that are fundamental to the best-engineered structures: the ethos of efficiency and the ethic of economy. Efficiency in this sense means the search for forms that use a minimum of materials consistent with sound performance and assured safety; economy signifies a minimum of construction costs consistent with low expense for maintenance. These two fundamentals imply a plan that pays attention to both design and construction. An engineer who designs efficiently and with a builder's mentality is considered a master builder. Such a person was Felix Candela. But he was more than that; he was also a structural artist – that is, an engineer who has all the qualities of a master builder and in addition possesses a strong aesthetic motivation. An engineer can be a master builder without being a structural artist, but one cannot be a structural artist without being a master builder. Many master builders are engineers who work for architects and consider the aesthetic to be the province of the architect; hence, they think of their structures as part of architectural art. Structural artists are engineers who consider it their mission to create the form – the aesthetic of a structure – as well as to conceive the technical design and the construction plan. A work of structural art is always the product of one person's imagination, an individual who conceives a new form, visualizes its final appearance, defines it by calculations, and develops a means of building it.

Engineer and Builder

Shortly after completing his degree in architecture in Madrid, the Spanish Civil War broke out and in 1939 Candela was exiled to Mexico. Once settled, he supported himself by building. He placed himself in the field and saw designs materialize. The built structures represented engineering and architecture in action, but they provided him almost no intellectual stimulation. He returned to reading the publications on thin shell analysis and design (which he had begun to read as a student in Madrid) and then began to experiment with building thin shell structures.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





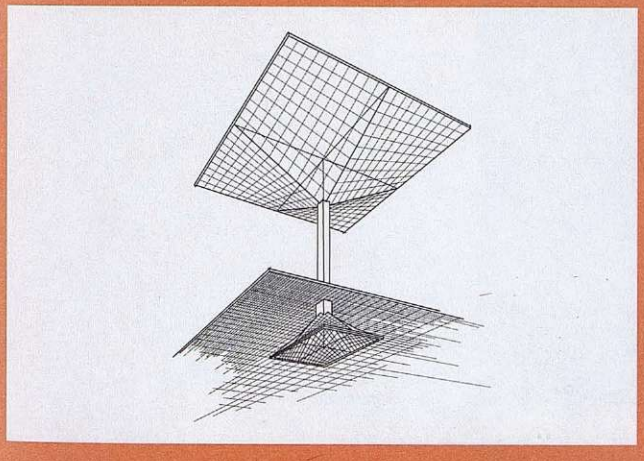
(F. 2)

The hyperbolic paraboloid hypar with curved (left) and straight edges (right)



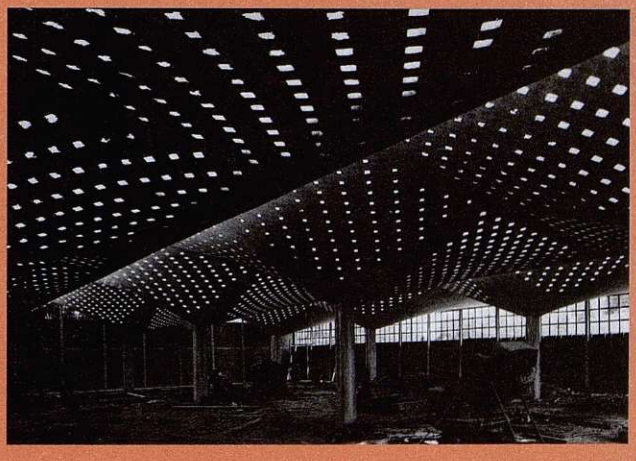
(F. 3)

Cosmic Rays Laboratory, 1951



(F. 4 b)

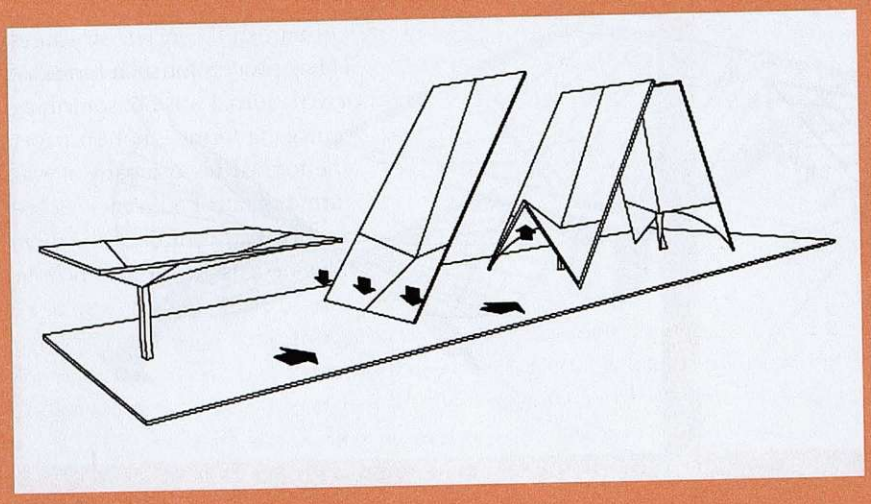
Candela's umbrella

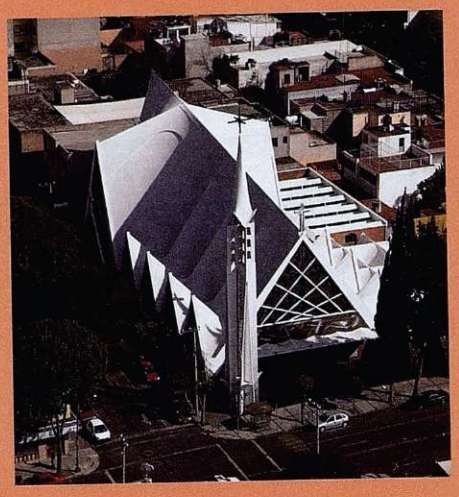


(F. 4 c)

High Life Textile Factory, 1954

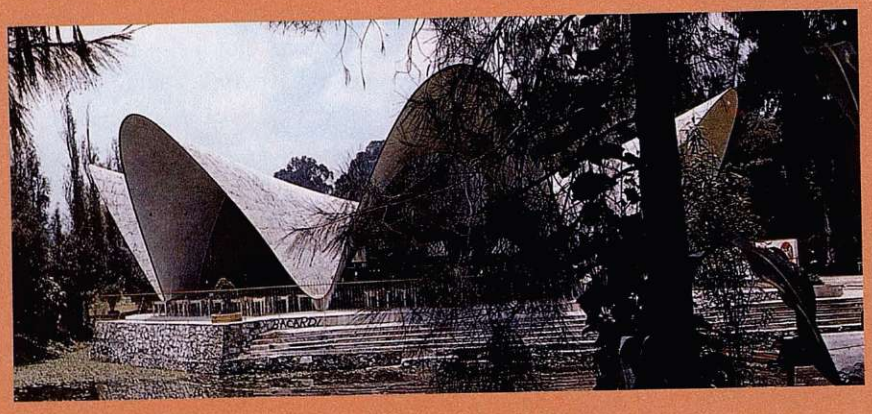
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 5)

Transformation of the umbrella to the Church of Our Lady of the Miraculous Medal, 1953
(Photo by Bruce White)



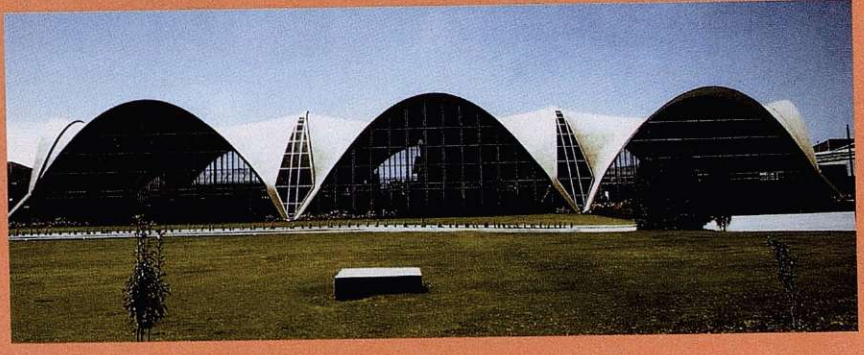
(F. 6)

Restaurant Los Manantiales in Xochimilco, 1958



(F. 7)

Chapel Lomas de Cuernavaca, 1958, under construction



(F. 8)

Bacardi Rum Factory, 1960

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

His work was directed toward understanding the performance of thin-shell concrete structures under load, but, in addition, he was gaining insight into the building process for such forms. At that time, the idea of publishing a research paper in a peer-reviewed journal was not something he considered. Rather, he was beginning to think like a builder, making forms – not on paper out of drawings but in the field out of concrete. Thus, when he formed his company, it was decidedly neither an architectural nor a consulting-engineering firm but rather a business devoted to building – he became a construction contractor. Candela then had control of the three parts of design that make one a structural artist: he engineered his designs, he formed them to be elegant and, he built them. In Candela's words, "[F]ew people realize that the only way to be an artist in this difficult specialty of building is to be your own contractor. In countries like this [the United States], where the building industry has been thoroughly and irreversibly fragmented and the responsibility diluted among so many trades, it may be shocking to think of a contractor as an artist; but it is indeed the only way to have in your hands the whole set of tools or instruments to perform the forgotten art of building, to produce 'works of art'..." [5]

We would slightly revise Candela's prescription for engineering works of art by expanding the term "be your own contractor" to include "to have a builder's mentality." When asked to name his favorite structures, Candela replied: Miraculous Medal Church, Restaurant at Xochimilco, the Bacardi Rum factory, and the Chapel at Cuernavaca. [2] These works form the core of our book and exhibition because as a group they provide the key to Candela's genius. Omitted from his list are his first hyperbolic paraboloid shell (Cosmic Rays Laboratory) and the many umbrella shells that comprised the bulk of his work but that he seems not to have considered worth identifying specifically. We discuss that missing set separately, also with the goal of offering further insight into Candela's ideas.

Candela's Significant Structures

From all these works, the same pattern emerges. Candela the builder makes a simplified analysis to justify the engineering design and then takes the overall form, which sometimes comes from somewhere else, and plays with it to make it structural art. This art can only arise when that play is disciplined by efficiency and economy. As Candela explained: "But an efficient and economical structure has not necessarily to be ugly. Beauty has no price tag and there is never one single solution to an engineering problem. Therefore, it is always possible to modify the whole or the parts until the ugliness disappears. This aversion to ugliness is quite the opposite of the task of the professional artist who has to produce beauty as an obligation or of today's star-architect who has to be original at any cost in each new project." [5]

By contrast all of Candela's significant structures were of one geometric form, the hyperbolic paraboloid (hypar), and with that discipline he could build them only 1.5 inches (4cm) thick. The doubly curved surface of the hypar form (F. 2) is developed with two straight line generators; thus, Candela achieved economy of construction by avoiding curved boards for his falsework in construction. While the climate in Mexico is more moderate than that in the United States, other designers successfully have built similar thin shell structures in harsh environmental conditions. For example, Heinz Isler designed many thin shell concrete structures in Switzerland; typically these were 3 inches thick and, like Candela's designs, they serve as models of efficiency, economy, and elegance.

Taken together, Candela's major thin shells have in common the manner in which he secured the commission, the stimulus for the shape, and the vision that led to the final completed structure. In each case, Candela was approached to be the builder. In the Cosmic Rays Laboratory of 1951, (F. 3) the architect already had a form – barrel shells – and when Candela took on the construction, he decided to change the barrels to hyperbolic paraboloids, his first such structure. Although no calculations seem to have survived, Candela certainly became the structural engineer, calling on his earlier study of French and German publications from the 1930s. In this project, he began with a construction contract in which he then acted as the structural engineering designer; thus, he started his career as a structural artist by modifying someone else's form to avoid its bland image and to express also its thinness visually. [9]

With the umbrella shells, he recalled his earlier study of a 1936 paper by Aimond [1], who showed a single umbrella with the same basic form that Candela would follow. Since he considered Aimond's umbrella shape (F. 4 a) visually defective, he refined it by 1952 to achieve a more

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

elegant appearance. (F. 4 b, c) Along the way, he had to find a means to analyze the structure to ensure its satisfactory performance. The umbrella he transformed into a church in 1953, Iglesia de la Medalla Milagrosa, (F. 5) which resulted from an unusual opportunity that afforded Candela to be the builder, designer, and artist for a structure that is traditionally a work of architecture. The church leaders wanted a gothic style church to be designed by an architect and built by Candela. He proposed a different design to the clergy who thinking it still to be gothic accepted it, but what they were getting was a true work of structural art. Again, however, the project was first a construction and a design second. Candela had great freedom because he had to work under the constraints of a banker's budget. The clergy were appalled at the resulting completed design but the local people were greatly pleased and the church has become a landmark of structural art. [11]

In 1958, he completed, the restaurant at Xochimilco. (F. 6) The same pattern emerges as in Milagrosa, the umbrella structures, and the Cosmic Rays Laboratory. He was asked by colleagues to take the project as both designer and builder, but once again the basic shape was not his idea. Colin Faber, working then at Candela's company Cubiertas Ala, made a sketch similar to what eventually became the shape of the restaurant. Candela considered the sketch a good beginning and proceeded to refine it carefully. He seems never to have created a new form in the sense that some architects do, often without any relationship to efficiency and cost. The restaurant is pure structure and reflects the sure hand of a structural artist. [3]

For the Cuernavaca chapel, (F. 7) also in 1958, an architect brought him a sketch of a triangular raised roof, which Candela reshaped into the thin curved structure that made the chapel unique and dramatic. Though the architect approached Candela the builder, the result was a work of pure structural art by Candela the artist. [6]

Finally, for a new project he was stimulated by the cylindrical the groin vaults of the St. Louis Airport terminal building designed by the architect Minoru Yamasaki and modified strongly by the engineer Anton Tedesko. For the next project he gained, whatever its function, Candela was determined to create three groined vaults as in St. Louis. It so happened to be a Bacardí Rum bottling plant. (F. 8) Once again, the client employed Candela as builder first, but that assignment also included, as did most of his other projects, functioning as structural designer too. The building is pure structure in a series of hyperbolic parabolid groined vaults. [10]

The Legacy of Structural Art in Education and in Practice

Because structural engineering since the Industrial Revolution has become a new art form parallel to but independent from architecture, it must form an important part of the education of civil engineers. Just as other forms of art – painting, sculpture, music and literature, structural engineering should focus on the exemplary works of structural artists in the education of engineers and in the broader education of all students. In studying the structures of the greatest structural artists such as Robert Maillart, Heinz Isler, Pier Lugi Nervi, and Christian Menn, both educators and practitioners can recognize the potential for this new art form in the 21st century. Felix Candela belongs in that class of the greatest of structural artists and thus of an essential and integral figure in the reinvigoration of our profession.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

References

[1] Aimond F.: "Étude statique des voiles minces en paraboloide hyperbolique travaillant sans flexion," Publications, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 4, 1936.

[2] Basterra A., Valero E.: "La Aventura Mexicana: Entrevista con Felix Candela," *Arquitectura Viva* 58, january-february, 1998.

[3] Burger N., Billington D.P.: "Felix Candela Elegance and Endurance: An Examination of the Xochimilco Shell," *Journal of the International Association of Shell and Spatial Structures* 27, no. 3, december, 2006, p.271-78.

[4] Candela F.: "Encuentra espacios" (an interview with Felix Candela), *Espacios: Revista integral de arquitectura, planificacion, artes plasticas*, 28, november-december, 1955.

[5] Candela F.: "New Architecture," *The Maillart Papers*, ed. David P. Billington et al., Princeton, 1973, p.119-26.

[6] Draper P., Garlock M., Billington D.P.: "Finite Element Analysis of Felix Candela's Chapel of Lomas De Cuernavaca," *Journal of Architectural Engineering*, 14(2), 2008, p.47-52.

[7] Faber C.: *Candela. The Shell Builder*, Reinhold Publishing, New York, 1963.

[8] Garlock M., Billington D.P.: *Felix Candela: Engineer, Builder, Structural Artist*, Yale University Press, New Haven, 2008.

[9] Kelly K., Garlock M., Billington D.P.: "Felix Candela's First Hypar: The Cosmic Rays Laboratory," *Proceedings of the International Symposium IASS-SLTE 2008*, Acapulco, Mexico, october 27-31, 2008.

[10] Segal E., Garlock M., Billington D.P.: "A Comparative Analysis of the Bacardi Rum Factory and the Lambert-St. Louis Airport Terminal," *Proceedings of the International Symposium IASS-SLTE 2008*, Acapulco, Mexico, october 27-31, 2008.

[11] Thrall A., Garlock M., Billington D.P.: "Analysis of Iglesia de la Medalla Milagrosa," *Proceedings of the International Symposium IASS-SLTE 2008*, Acapulco, Mexico, october 27-31, 2008.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Félix Candela: su legado a México y al mundo

Juan Gerardo Oliva Salinas
Dr. Ingeniero Arquitecto
Laboratorio de Estructuras
Profesor del Centro de Investigaciones y Estudios de Postgrado
Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, México

Antecedentes

En la primera parte de este artículo se describen anécdotas, hechos y consejos que Félix Candela brindó al autor del mismo; en la segunda parte, se describe el legado de Félix Candela a México y al mundo.

Tuve el privilegio de conocer a Félix Candela Outeriño, no como profesor de estructuras en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), donde fungió como docente durante 17 años y donde cursé mis estudios de Arquitectura, sino ya como consagrado arquitecto en la Universidad de Stuttgart, Alemania, en 1977. Fue un encuentro agradable y sencillo, como lo fue Candela personalmente a lo largo de su vida. Nadie nos presentó, simplemente me acerqué a él y sin más iniciamos una charla corta pero muy significativa que jamás olvidaré.

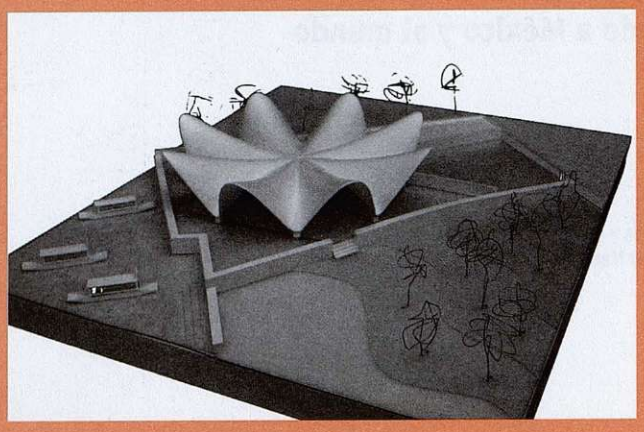
"Olvídese del país, de la universidad y del idioma donde se encuentre, lo que usted quiera aprender debe hacerlo por usted mismo, por autoestudio"

Éste fue el consejo y algunas de las primeras palabras que recibí de Félix Candela cuando le conocí y él se encontró frente a un joven estudiante mexicano iniciando sus estudios de posgrado en Alemania. Confieso que este modo de aprender es el que siempre había ejercido desde mis estudios de licenciatura en la UNAM, pero de alguna manera las palabras de Candela me hicieron reflexionar profundamente al respecto y me regresaron la confianza en mí mismo, que se había deteriorado considerablemente debido al cambio de medio cultural que me encontraba experimentando al haber dejado el México familiar y tradicional para introducirme en la rígida sociedad alemana. Éste fue el legado personal que Candela me transmitió.

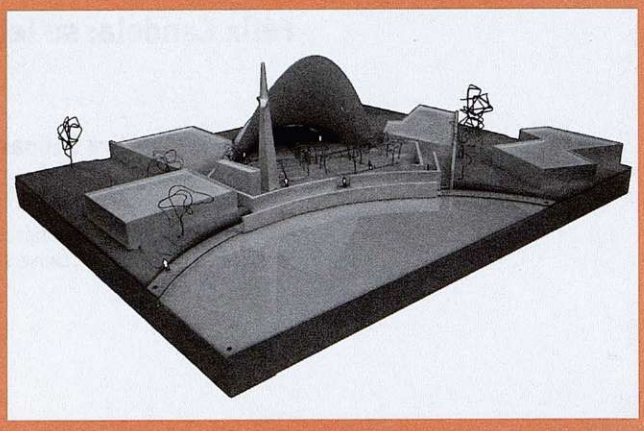
Cuando en lugar y tiempo se conjuntan una serie de factores específicos, es posible que se favorezca la producción de cambios, aportaciones e innovaciones en beneficio de la sociedad, de la ciencia y de la tecnología. Félix Candela fue sin duda un personaje que, aprovechando esa conjunción de factores y sumándolos a su capacidad, ingenio y tenacidad, consiguió un lugar muy significativo en el desarrollo de los sistemas estructurales contemporáneos. Si bien Félix Candela no fue el descubridor del paraboloide hiperbólico, sí fue quien supo manejarlo hábilmente, y fue tal su maestría para hacerlo de una manera congruentemente adecuada al contexto socioeconómico de México que su obra y sus aportaciones alcanzaron reconocimiento a nivel mundial.

Félix Candela nos brindó así un legado a México y al mundo que nos invita a reflexionar sobre el presente y futuro del diseño estructural y arquitectónico, sobre el uso eficiente de los materiales y el respeto a los recursos naturales y al medio ambiente, sobre la armonía de conjugar la forma con su comportamiento estructural, sobre las superficies de paraboloide hiperbólico, que además de su eficiencia estructural son bellas. Esta última palabra sobre la belleza no puedo olvidarla, cuando en una conferencia durante las conclusiones en 1979 del II Simposio Internacional sobre Estructuras Laminares en la Universidad de Stuttgart, Candela expresó: "Permítanme terminar hablando de algo que siempre me inquieta en esta clase de reuniones. Nadie habla de belleza, tal vez porque no puede ser medida y los ingenieros tienen una deformación profesional para lidiar sólo con hechos de este tipo. Por lo tanto se han expuesto varias conferencias serias sobre los esfuerzos en todas direcciones, sus concentraciones y deformaciones subsecuentes, pero la pobre belleza siempre está olvidada. Sin embargo, deberíamos recordar que gran parte del éxito de estas estructuras se debe al hecho de que generalmente son muy bellas –exceptuando los intentos de muchos diseñadores por lograr lo contrario– y por lo tanto claman a un anhelo subconsciente del género humano".

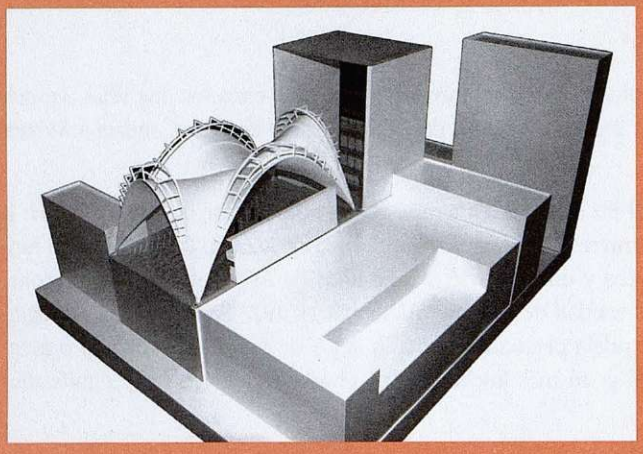
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



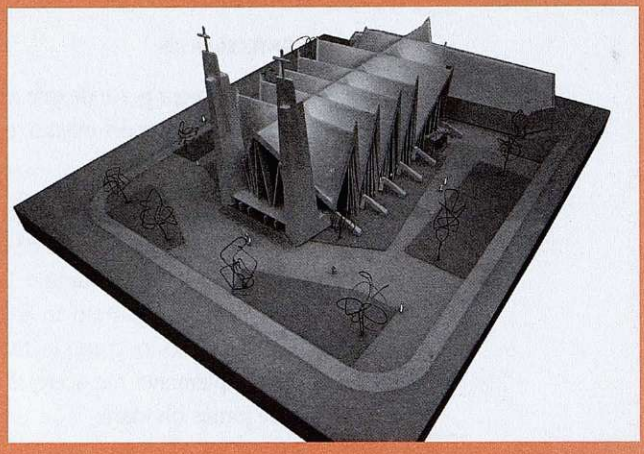
(F. 1)



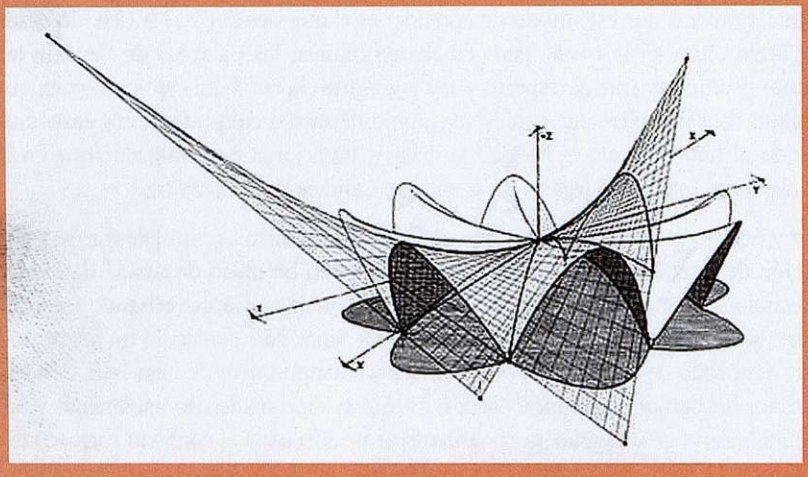
(F. 2)



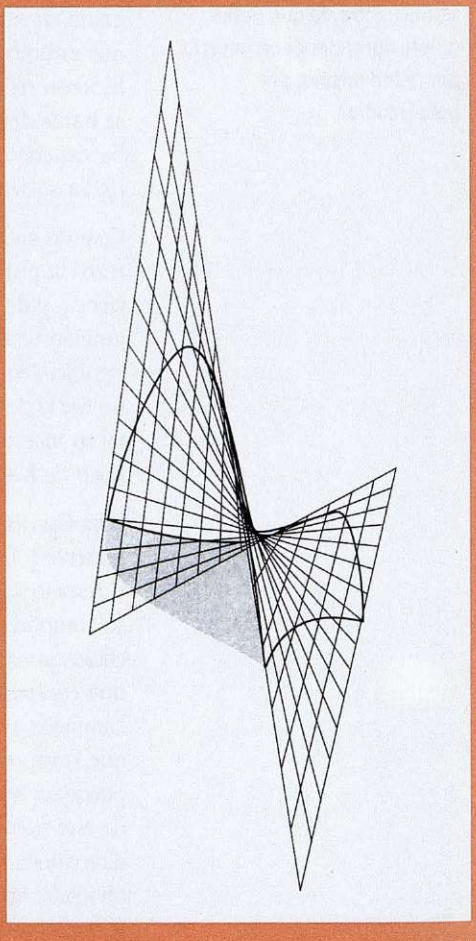
(F. 3)



(F. 4)



(F. 5)



(F. 6)

(F. 1) Maqueta del Restaurante Los Manantiales
Joaquín Álvarez Ordóñez, Fernando Álvarez Ordóñez y Félix Candela
México D.F., 1956-1957

(F. 2) Maqueta de la Iglesia de San Felipe de Jesús
Manuel La Rosa, Guillermo Rosell y Félix Candela
Cuernavaca, México, 1957-1958

(F. 3) Maqueta de la Sala de Remates de la Bolsa Mexicana de Valores
Enrique de la Mora, Fernando López Carmona y Félix Candela
México D.F., 1954-1955

(F. 4) Infografía de la Iglesia de Nuestra Sra. de Fátima
Porfirio Ballesteros y Eduardo Padilla Negrete
Nuevo León, México, 1960

(F. 5) Paraboloide Hiperbólico. Restaurante Los Manantiales

(F. 6) Paraboloide Hiperbólico. Iglesia de San Felipe de Jesús

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Contaba en aquel entonces con 29 años de edad y me encontraba realizando mis estudios de postgrado en dicha Universidad. Anhelaba entonces aprender lo más posible de las grandes figuras, de Félix Candela, Frei Otto, Heinz Isler, entre otros más, presentes en este Simposio y, sin duda alguna, de los personajes más relevantes de la reunión.

Ciertamente las obras de Félix Candela no sólo satisfacen las condicionantes enunciadas en el párrafo anterior, sino que son obras bellas, donde la capacidad creativa y compositiva de Candela y de muchos otros arquitectos e ingenieros mexicanos se conjugaron magistralmente. También recuerdo que Candela alabó la capacidad organizativa de Frei Otto, liderando equipos de trabajo multidisciplinarios en una Universidad que se distingue mundialmente por su excelencia científica y tecnológica, y donde el apoyo y fomento a la investigación y la docencia se ofrecían generosamente. Candela reconoció no tener la habilidad organizativa de Frei Otto para reunir equipos de gente dedicada y talentosa ayudándole a desarrollar sus ideas y publicarlas, por ello "mi contribución ha sido mucho más limitada" afirmó Candela.

No obstante a estas observaciones de Candela, nos encontramos hoy en día celebrando el centenario de su nacimiento, y haciendo un recuento de algunas de las publicaciones y eventos de la obra de Candela, encontramos no solamente el libro de Colin Faber *Candela, The Shell Builder* [Candela, el constructor de cascarones] publicado originalmente en 1963 por Reinhold Publishing Corporation, Nueva York. Otras muchas publicaciones y traducciones en diferentes idiomas le han seguido en los últimos años, y en octubre de 2008, David Billington y María Garlock en la Universidad de Princeton en Estados Unidos, organizaron un simposio llamado *Felix Candela, Engineer, Builder, Structural Artist*, que consistió además del simposio de una magnífica exposición de maquetas, planos y documentos personales de Candela y la publicación de un libro.

En octubre de 2008, la Facultad de Arquitectura de la UNAM organizó y celebró el Simposio Internacional IASS-SLTE 2008 Acapulco, México, donde se conjuntaron el simposio anual de la International Association for Shell and Spatial Structures IASS [Asociación Internacional de Cascarones y Estructuras Espaciales] y el III Simposio Latinoamericano de Tenso-estructuras. En este evento se presentaron varias sesiones sobre Félix Candela y se inició el proyecto *Aquella primavera creadora... Cascarones de Concreto Armado en México*, que se conforma por una exposición de maquetas y carteles con información escrita y gráfica sobre los cascarones de concreto armado diseñados y construidos en México durante las décadas de 1950 y 1960; se elaboró un vídeo con entrevistas de arquitectos ex-colaboradores de Candela y de otros diseñadores y constructores de cascarones que fueron influenciados y motivados por su obra y también se publicó un libro con algunos artículos alusivos a este mismo tema (F. 1, 2, 3, 4).

Lo anterior se ha convertido en un preámbulo a los festejos del centenario de la fecha de nacimiento de Félix Candela, el 27 de enero de 1910 y que se llevarán a cabo en la Universidad Politécnica de Madrid UPM, España, y a lo largo del año 2010 en la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM.

El legado de Félix Candela

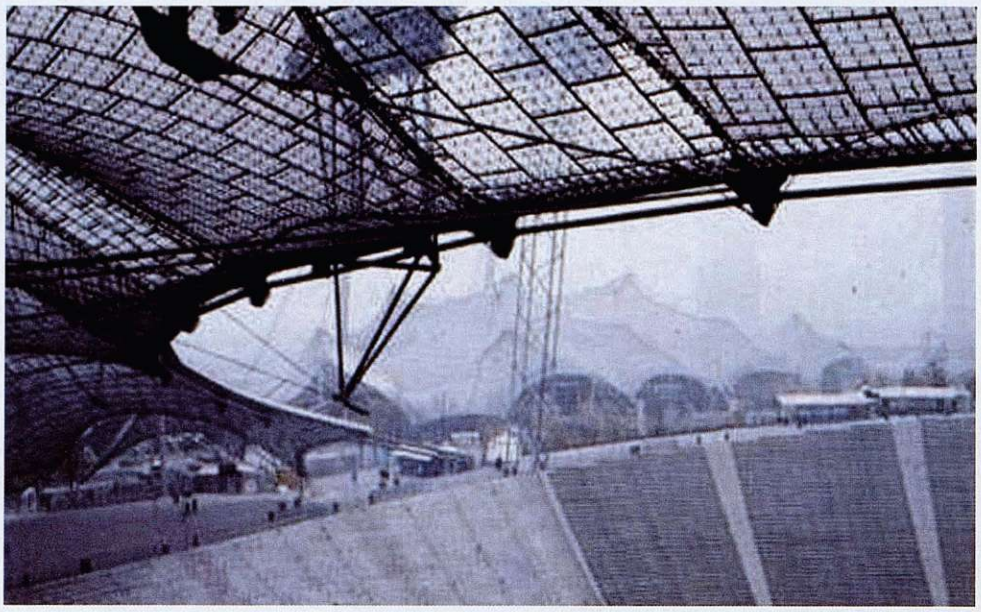
El legado de Félix Candela consiste en cómo concebir y diseñar una estructura que sea bella, cuya forma obedezca a una correspondencia con su comportamiento estructural, donde los materiales constructivos se empleen eficientemente, cuidando los recursos naturales y sin agredir al medio ambiente, disminuyendo costos y tiempos de ejecución. Además podemos identificar dos áreas del conocimiento donde Candela también brindó su legado a México y al mundo: *la geometría y la mecánica* (F. 5, 6).

El paraboloide hiperbólico y los cascarones de concreto armado se encuentran íntimamente ligados al nombre de Candela. La elipse, la parábola y la hipérbola que constituyen las curvas cónicas las reporta por primera vez en la historia el matemático griego Menecmo (c.320 a.C.). Vemos así que el conocimiento geométrico de estas curvas data de muchos años atrás; sin embrago es Félix Candela quien nos lega la sabia aplicación del paraboloide hiperbólico en la concepción, diseño y construcción de cascarones de concreto armado entre los años 1949 y 1970; y no sólo en los cascarones con doble curvatura inversa, ya que no debemos olvidar la impresionante y bien lograda cubierta del Palacio de los Deportes para los juegos Olímpicos de 1968 en la Ciudad de México, en coautoría con los arquitectos Antonio Peyrí Maciá y Enrique Castañeda Tamborell (F. 7).

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 10)

Estadio Olímpico de Múnich
Fritz Leonhardt, Jorg Schlaich,
Günter Mayr, Frei Otto
y Günter Behnisch
Múnich, Alemania, 1972



La fructífera y significativa obra de Félix Candela en México se diseminó con la inclusión del talento y la capacidad creativa de varios arquitectos mexicanos. Es importante hacer notar que las bellas formas logradas con las superficies alabeadas no obedecen a meros caprichos formales, no se trata de la forma por la forma, como hoy en día podemos identificar en muchas obras de la arquitectura contemporánea. En las obras de Candela existe una plena convicción del correcto aprovechamiento de los recursos naturales, de lograr la máxima eficiencia con un mínimo de materiales, de aprovechar los beneficios de la doble curvatura inversa para alcanzar una mayor rigidez en la estructura, con espesores de 4cm y hasta de 1,5cm como lo demostró en la cubierta del Laboratorio de Rayos Cósmicos (1952) en la Ciudad Universitaria, mejorando la propuesta original del arquitecto Jorge González Reyna (F. 8).

Félix Candela no aplicó por primera vez las superficies del paraboloide hiperbólico en sus diseños estructurales; podemos mencionar a Antonio Gaudí (1852-1926), el innovador arquitecto catalán, quien añadió estas superficies alabeadas en varias de sus obras. Sin embargo, Candela fue quien sí aprovechó hábilmente las virtudes de su relación forma-comportamiento estructural, atendiendo a principios de la sustentabilidad, de lo cual día a día se hacen conscientes más personas en todo el mundo. Es importante cuidar y aprovechar de manera eficiente y ahorrativa los recursos naturales actuales; de otra manera, las generaciones futuras pagarán una factura muy elevada para subsanar lo que hoy gastemos innecesariamente, bajo la justificación de impresionantes formas y volúmenes en alegoría a la forma.

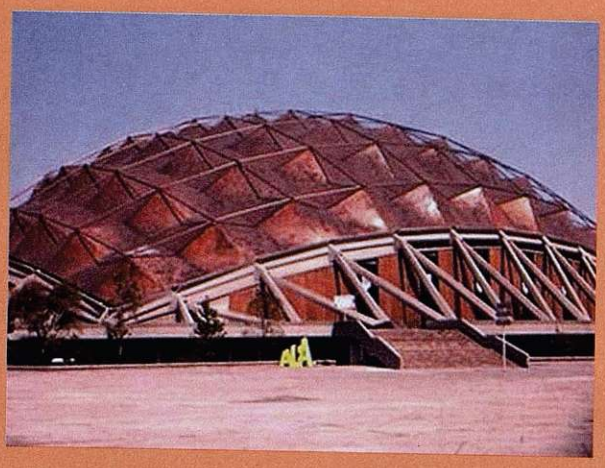
"Los estilos marcan la pauta seguidos por la inercia mental colectiva y solamente la persona ´genio´ es capaz de vivir en un clima de total libertad para crearlo. Lo peligroso del caso es que el genio se dedique a producir obras que –aun llevando el sello inconfundible del talento y teniendo, por tanto, la fuerza y el impacto plástico suficientes para arrastrar tras sí a la masa común– no estén basadas en auténticos valores arquitectónicos, creándose de este modo un nuevo formalismo sin sentido y, por consiguiente, más perjudicial..."

Cuando Candela conoció la terminal del aeropuerto Lambert-St. Louis, construido en 1956 en los Estados Unidos por Anton Tedesko, Minoru Yamasaki y William Becker; decidió demostrar con el proyecto de las cubiertas para la Planta Embotelladora de Bacardí, que él podía realizar una estructura análoga más simple y elegante, sustituyendo los cascarones de concreto armado diseñados con base en la intersección de bóvedas cilíndricas en St. Louis por cascarones diseñados basándose en la intersección de paraboloides hiperbólicos (F. 9). Candela generó una cubierta casi tres veces más delgada, salvando un claro 1,5 veces menor. Se debe tomar en cuenta que las cargas a las que se someterían los cascarones de Candela son menores a las consideradas en St. Louis que deben soportar nieve y cambios drásticos de temperatura. Candela logró así un diseño estructural más cercano a los principios de sustentabilidad que pregonó durante su práctica profesional y académica.

La continuidad del legado de Candela se extiende con la arquitectura textil contemporánea. Las superficies con doble curvatura inversa resurgen posteriores a las obras de Candela en las estructuras velarias que hábilmente desarrolló el arquitecto alemán Frei Otto (1925) (F. 10).

Recordemos ahora las palabras escritas por Otto, en el prefacio de la *Guía de Diseño Europeo para Estructuras con Superficies a Tracción*, sobre las encomiendas de los arquitectos: "La búsqueda de lo

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



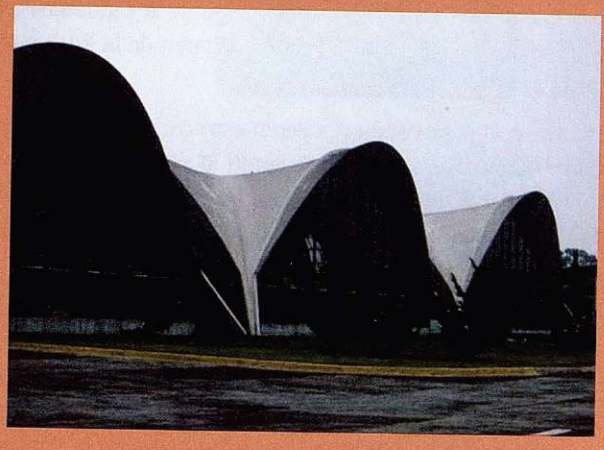
(F. 7)

Palacio de los Deportes
Antonio Peyrí Maciá, Enrique Castañeda y Félix Candela
México D.F., 1968



(F. 8)

Laboratorio de Rayos Cósmicos
Félix Candela y Jorge González Reyna
Ciudad Universitaria, México D.F., 1952



(F. 9)

Planta Embotelladora Bacardí
Félix Candela y Juan Antonio Tonda Magallón
México D.F, 1960

Um die Differentialgleichung des Systems zu erhalten, leitet man die zu den Verschiebungen η und ζ gehörige Krümmungsänderung $\varkappa$ ab.

$$\varkappa = \frac{1}{R^2}\left(\zeta + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial \omega^2}\right) = -\frac{12 M_2}{E d^3}$$

und setzt die Spannungsfunktion ein

$$\frac{d^8 f}{d\omega^8} + \frac{d^6 f}{d\omega^6}(1+2a) + \frac{d^4 f}{d\omega^4}(1+2a+a^2) + \frac{d^2 f}{d\omega^2}(2a+a^2) + 4a^2 b^2 f = 0 \qquad (7)$$

Abkürzungen

$$\frac{c^2 R^2}{L^2} = a; \qquad \sqrt{3}\,\frac{R}{d} = b. \qquad (8)$$

(F. 12) Fragmento del libro de Ulrich Finsterwalder, con anotaciones de Candela

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 11 a, b)

Palacio de la Minería
Juan Gerardo Oliva Salinas
y Ernesto Natarén de la Rosa
Laboratorio de Estructuras, UNAM
México D.F., 2002

natural en la arquitectura no restringe sus posibilidades, las incrementa... y esto puede ser utilizado para establecer si los productos resultantes son más ahorradores de energía, más ligeros, más flexibles y más cercanos a los seres humanos".

La arquitectura textil se ha desarrollado en muchos países del mundo y México no ha sido la excepción. En el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, se han concebido y realizado varias estructuras velarias en las cuales se evidencia la aplicación del paraboloide hiperbólico, el cual garantiza la doble curvatura inversa, *condicio sine qua non* de las superficies que conforman dichas estructuras. Como ejemplo tenemos la cubierta velaria sobre el patio principal del Palacio de Minería en el Centro Histórico de la Ciudad de México, realizada por el autor de este artículo con el arquitecto Ernesto Natarén de la Rosa y miembros del Laboratorio de Estructuras (F. 11 a, b).

La correcta simbiosis de la forma con su comportamiento estructural constituye parte esencial del legado de Félix Candela. Una ecuación tan simple como lo es $z = kxy$, exasperó a muchos ingenieros y calculistas de estructuras de aquellas épocas. Se trataba de una sencilla ecuación que posteriormente iba a definir tanto la forma de la estructura como la distribución de esfuerzos en la misma. Sin embargo, para llegar a ello, quedaron atrás muchos años de autoestudio, como el mismo Candela lo pregonó y que queda evidente en las traducciones y anotaciones de estudio que Candela hizo en los libros de Ulrich Finsterwalder, escritos en alemán (F. 12).

Esa unión de capacidades y habilidades de Candela con otros muchos arquitectos mexicanos llevó al diseño y construcción de muchos edificios con cubiertas ligeras, en su mayoría de orden religioso, que dan una fisonomía muy característica a muchas calles de la ciudad de México. Identificamos así algunas de estas obras donde se indican los nombres de sus creadores, además del mismo Félix Candela (F. 13, 14, 15, 16).

Félix Candela también influyó y motivó la creación de cascarones de concreto armado realizados por otros arquitectos e ingenieros mexicanos y esta influencia también permeó a otros países del mundo. En México podemos identificar la Iglesia de Fátima, construida en 1960 en Monterrey, Nuevo León, del arquitecto Eduardo Padilla Negrete y del doctor en ingeniería Profirio Ballesteros Barocio (F. 17).

En la entonces Alemania del Este encontramos los cascarones de concreto armado de Ulrich Müther (1934-2007), quien hábilmente supo aplicar la tecnología del concreto armado y las superficies de paraboloide hiperbólico al contexto socio-económico de un régimen comunista, "inspirado por las obras de Félix Candela", como el mismo Ulrich Müther reconoció en vida (F. 18).

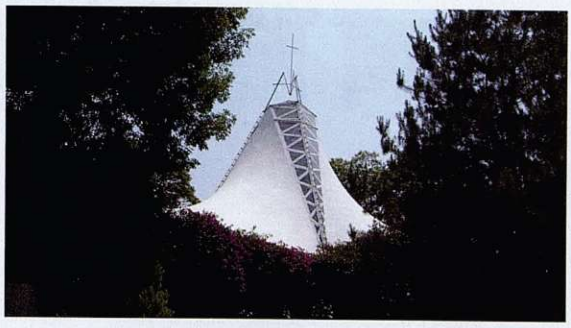
Conclusiones

Cómo concebir, diseñar y construir cascarones de concreto armado, realizando bellas estructuras con un mínimo de material y con una máxima eficiencia estructural, generando una arqui-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

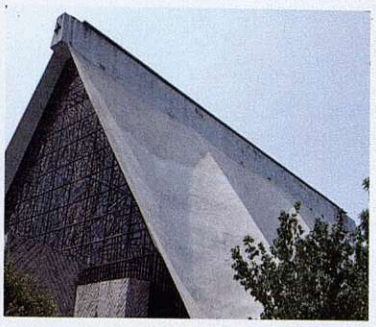
(F. 13)

Iglesia de San Vicente de Paúl
Enrique de la Mora, Fernando López Carmona y Félix Candela
México D.F., 1959



(F. 14)

Iglesia Nuestra Sra. de Guadalupe
Alberto González Pozo, Félix Candela y Juan Antonio Tonda
México D.F., 1961



(F. 15)

Parroquia de San Pedro de Verona Mártir
Félix Candela y Juan Antonio Tonda
México D.F., 1963



(F. 16)

Iglesia de Santa Mónica
Fernando López Carmona y Félix Candela
México D.F., 1965



(F. 17)

Iglesia de Nuestra Sra. de Fátima
Porfirio Ballesteros y Eduardo Padilla Negrete
Nuevo León, México, 1960



(F. 18)

Restaurante Seerose
Ullrich Müther
Postdam, Alemania, 1980



tectura sustentable y diseminando su influencia en México y en otros países del mundo, constituyen gran parte del legado de Félix Candela. Sus aportaciones en las áreas de la geometría y de la mecánica complementan esa herencia. Sirvan sus enseñanzas como ejemplo y condicionantes a cumplir en la arquitectura y en el diseño estructural contemporáneo y futuro.

Referencias

[1] Candela F.: *Remarks on the Stage Development*. Weitgespannte Flächentragwerke: Internationales Symposium Stuttgart 1979. Stuttgart: Universität Stuttgart, 1979: 14.

[2] Del Cueto Ruiz-Funes J.I. (ed.): *Aquella primavera creadora... Cascarones de concreto armado en México*. México: Facultad de Arquitectura, UNAM, 2008.

[3] Faber C.: *Candela and seine Schalen*. Germany: Verlag Georg D. W. Callwey, 1965.

[4] Forster B., Mollaert M.: *European Design Guide for Tensile Surfaces Structures*. Brussels: Vrije Universiteit Brussel, Tensinet, 2004: 7.

[5] Joedicke J.: *Schalenbau: Konstruktion und Gestaltung*, Dokumente der Modernen Architektur Herausgegeben. Stuttgart: Karl Krämer Verlag Stuttgart, 1962.

[6] Moreyra Garlock M.E., Billington D.P.: *Felix Candela: Engineer, Builder, Structural Artist*. New Haven y Londres: Yale University Press, 2008.

[7] Oliva Salinas J.G. (ed.): *Book of Abstracts: IASS-SLTE 2008 Simposium Acapulco México*, Facultad de Arquitectura, UNAM, 2008.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Felix Candela and the IASS

John F. Abel

President of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)
Professor Emeritus of Civil and Environmental Engineering
Cornell University, USA

The sole international association with a focus on shell structures, the International Association for Shell Structures (IASS),[1] was founded in 1959 under the leadership of Eduardo Torroja at a meeting in Madrid attended by approximately 100 shell designers, mainly from East and West Europe and only a very few from the Americas. But one of the most renowned shell builders of that era, Felix Candela, was not among the attendees, nor was Pier Luigi Nervi, arguably the equally admired shell designer of the post-war period [1]. Both men had designed and built most of their major shell structures during the 1950s prior to the founding of the IASS, and both were already well recognized on the world stage. Of course, Candela was living in exile in Mexico following the Spanish civil war, and nearly all of his principal works were accomplished there. David Billington has written, "It seems obvious that the [absence] of Candela had a political motivation, but one that most likely was not the work of the engineers organizing the [IASS founding] colloquium [2]." Despite the new Association's broad reach across political borders that has continued throughout its history, the divides created by the civil war had not faded sufficiently by 1959.

First IASS Honorary Member

But the IASS began to designate Honorary Members in 1963, and the two first such honorees – in fact, the only two awarded in the 1960s[2] – were Candela and Nervi [3]. To the best of the author's knowledge, Nervi never formally participated in the IASS; but Candela developed a growing involvement with the Association in succeeding years. At first, he was an invited speaker at IASS conferences in the Western Hemisphere such as the World Congress of Shell Structures held in San Francisco in 1962 [4]. His involvement began in earnest in 1967 when the annual IASS congress was held in Mexico City, where Candela's Honorary Membership, declared in 1963, was more formally conferred. At the Mexico congress, Candela was one of the six general reporters, on "the problems of the form and of the scale and their limits" [5]. Later, Candela was a frequent keynote speaker at IASS conferences, some of which will be cited below.

Candela and Torroja

There has been some speculation (and misinformation[3]) about whether Candela was influenced through direct contact with the founder of the IASS, Eduardo Torroja. While it is clear that Candela's interest in thin-shell structures arose in the 1930s in the context of Torroja's design

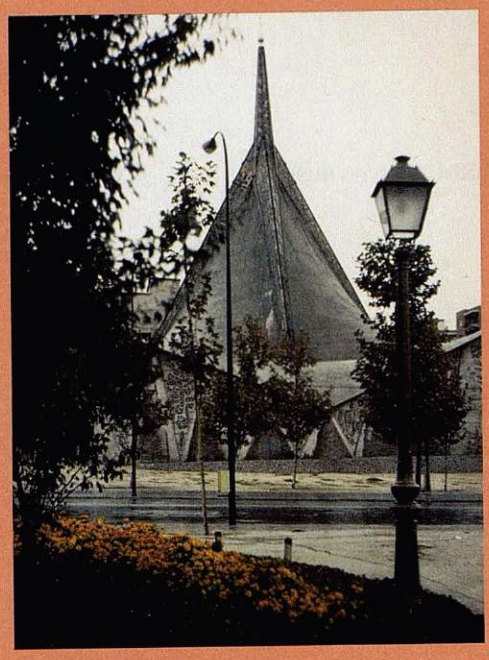
This paper is based on an unpublished address, "Felix Candela and the International Community of Shell Designers," presented by the author at the Symposium on *Felix Candela: His Influence for Today and the Future* held at Princeton University on 11 October 2008.

[1] The name of the Association was not broadened to the International Association for Shell and Spatial Structures until a decade after the 1959 founding, but the acronym IASS was retained upon the renaming.

[2] The third IASS Honorary Membership was awarded to Yoshikatsu Tsuboi in 1971 as the Association was cementing its outreach to Japan that had begun in the 1960s.

[3] One (commercial) document on the Internet contains the statement that Candela was "[a] student of Eduardo Torroja." *http://www.monolithic.com/stories/the-history-of-thin-shells-and-monolithic-domes.*

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 1)



(F. 2)



(F. 3)

(F. 1)

Parroquia de Nuestra Señora
de Guadalupe, Madrid, exterior

(F. 2)

Parroquia de Nuestra Señora
de Guadalupe, Madrid, interior

(F. 3)

Structural model study for Parroquia
de Nuestra Señora de Guadalupe,
Madrid, conducted by J.A. Torroja at
the Laboratorio Central de Estructuras
y Materiales

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

and construction of his three exemplary concrete shell roofs (Algeciras Market Hall, 1934; Zarzuela Hippodrome, Madrid, 1935; and Fronton Recolectos, 1935), it appears that Torroja's influence on Candela was mainly indirect. Moreyra Garlock and Billington have written [6, p. 56] and quoted Faber: [7] "Candela's interest in shells began when he was in his sixth year at the university. During this time, examples of thin vaults began to appear in architectural and engineering magazines, and Eduardo Torroja was building a thin-shell concrete vault, Fronton Recoletos, in Madrid. Candela went to see the construction: 'I found Torroja on top of the formwork and asked him to explain in general terms how the enormous barrel vault would function. He did not answer me very affably, which hurt my feelings. Later he gave a conference at which he described with a grand array of equations the calculations he had made, but like most of the audience I could understand nothing.' [7] Candela described Torroja's presentation as having 'heroic characteristics for its breadth and complexity…"

But there is another indirect connection that occurred only after Eduardo Torroja's death in 1961. From 1963-1965, Candela participated in a joint Mexican-Spanish project for the design of the Parroquia de Nuestra Señora de Guadalupe in Madrid (F. 1, 2). He collaborated as consulting engineer with Jose Antonio Torroja and the architects Jose Ramon Azpiazu (Spain) and Enrique de la Mora y Palomar (Mexico) [8]. And the structural model studies for this design (F. 3) were carried out by Torroja the younger in the Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, one of the Spanish national laboratories established under the direction of Eduardo Torroja at CEDEX and the home of the Secretariat of the IASS, then and continuously to the present.

Candela as a Frequent IASS Keynote Speaker

A typical example of Candela's participation in IASS conferences was his role as the first general lecturer at the IASS Symposium on Shell Structures and Climatic Influences held in Calgary in 1972. [9][4] Candela's keynote lecture was characteristically piercing and sardonic. He contrasts response to climatic demands by indigenous buildings with those "designed by architects … [and] engineers … express[ing] the fashion of technologically advanced nations." [9, p. 3] Taken as a whole, his lecture could be mistaken for a contemporary talk on 'green' building. Moreover, consistent with his belief that simplified methods could be used in the design of structures when accompanied by a deep understanding of structural behavior and constructional realities, [10] he hopes that professional meetings might address "recommendations for design instead of the usual and repetitious flood of analytical papers"[5] and that "as a general principle, supported by experience, that the quality of any structural design is in inverse proportion to the amount of mathematical effort necessary for its detailing and erection." [9, p. 4] He concludes his critique with: [9, p. 6] "I should say that the main purpose of this conference ought to be to find ways of designing structures honestly adapted to climatic conditions, rather than to provide means for inappropriate design ideas to withstand the effects of such conditions. Sensible design can obviate a great deal of subsequent trouble, and sensible men would naturally avoid unnecessary trouble. But I am not so sure that man is a sensible or rational animal, considering – as Ortega y Gasset said – the enormous amount of work that men are willing to endure in order to elude the painful burden of thinking."

One of the most notable appearances by Candela at an IASS event was his keynote address at the 20th Anniversary of IASS World Congress on Spatial Structures, held in Madrid in September 1979 [11][6]. His opening remarks cited his return to Spain: "I am pleased and thankful for the opportunity given to me of return to my birth place, [to] speak to you, and meet old friends…"

[4] As this was the first IASS conference that the author attended, it holds a special personal interest, reinforced by the anecdote in the following note.

[5] Ironically, virtually all of the other papers at this technical conference were effectively "analytical," and only one presentation – by the author and D. P. Billington on the buckling of cooling tower shells – included a photograph of an actual structure. Fortuitously, this photograph stimulated Candela to introduce himself to us ("I admired your shell structure...,") a meeting that led to our invitation for him to participate in a conference commemorating the centenary of Robert Maillart that resulted in Reference [10].

[6] There were only two keynote addresses appearing in. [11] The other is by the most prolific contemporaneous shell designer, Heinz Isler, and was entitled "New Shapes for Shells – Twenty years after." As the youngest participant, Isler had made a presentation at the IASS founding meeting in 1959 on New Shapes for Shells.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Later in his introduction when he addresses his motivation for becoming a shell builder, he includes a very kind acknowledgement of a formative influence by Eduardo Torroja: "[I]n the days when I was studying Architecture in Madrid, our dear master, Prof. Torroja, was building wonderful examples of [shells], such as the Zarzuela Hippodrome, the Algeciras Market or the Fronton Recoletos, and I was greatly impressed by the apparently fabulous feat of covering such large spans with so little material. Therefore, I am very much obliged to Prof. Torroja for his inspiration, although our personal contact was quite small..."

The 20th Anniversary address contains an extensive account of his design philosophy and his works, including 51 photos.

Subsequently, the IASS continued to invite Candela to speak, to discuss his work, and to honor him. For example, a session jointly sponsored by the IASS, the American Society of Civil Engineers (ASCE), and the ACI-ASCE Committee on Concrete Shell Design was held in Philadelphia in 1983 entitled, "The Felix Candela Session on the Aesthetics of Structures." The five speakers at this session were all distinguished engineers – three were, or later became Presidents of the IASS: Rafael Lopez Palanco (Spain, IASS President 1980-86), Stefan J. Medwadowski (USA, 1991-2000) and Mamoru Kawaguchi (Japan, 2000-2006); and the other two were Christian Menn (Switzerland) and David P. Billington (USA).

Closing Remarks

Even after Candela's death in 1997, the IASS continues to celebrate his life and works. At the IASS Symposium 2008 in Acapulco, Mexico there were a number of papers exploring his shell structures, a film extolling his creativity, and a field trip to visit his well-known chapel in Cuernavaca. And in 2010, the *Journal of the International Association for Shell Structures*[7] will publish a special issue commemorating the centenary of his birth.

The IASS is one of the few international associations to successfully bring together architects, engineers, builders and academics. In Felix Candela, the Association had a long-time member who at one time or another in his career filled all four of these roles splendidly.

Acknowledgements

As is evident from scanning the References to this paper, the author is indebted to his mentor, colleague and friend David P. Billington for many of the ideas and writings that contributed to this brief paper. The author is also grateful to Maria Moreyra Garlock and David Billington for the opportunity to gather this material for a presentation at the Symposium on Felix Candela: His Influence for Today and the Future, held at Princeton University on 11 October 2008, one aspect of the admirable "Candela Project" at that university.

[7] Effective 1996, the name of the *Bulletin of the IASS* was changed to the *Journal of the IASS*.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

References

[1] Billington D.P.: *The Tower and the Bridge: The New Art of Structural Engineering*, Princeton University Press, 1983, Chapter 10 contrasting the Italian and Spanish schools of shell design.

[2] Billington D.P.: "The founding of the IASS: Eduardo Torroja and the context until 1959," *Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures*, IASS 50th Anniversary Jubilee Book, Mungan I. and Abel J.F. (eds.), in preparation for publication in 2010, Chapter 1.

[3] *http://www.iass-structures.org*

[4] *Proceedings of the World Congress on Shell Structures*, San Francisco, 1962, Building Research Advisory Board, 1962.

[5] Candela F.: "The problems of the form and of the scale and their limits - General Report," *Proceedings, IASS Congress of Mexico: The Application of Shell Structures*, september 1967, pp. 35-41. Also published in the *Bulletin of the International Association for Shell Structures*, n. 40

[6] Moreyra Garlock M.E., Billington D.P.: *Felix Candela: Engineer, Builder, Structural Artist*, Princeton University Art Museum-Yale University Press, 2008.

[7] Faber C.: *Candela: The Shell Builder*, New York, 1963, p. 12.

[8] Azpiazu J.R.: *In Proceedings of the IASS Symposium: Problems of interdependence of design and construction*, Gosstroy, Leningrad, USSR, 1966.

[9] Candela F.: "Shell structures and climatic influences," *Proceedings of the IASS Symposium on Shell Structures and Climatic Influences*, The University of Calgary, July 1972, pp. 3-6.

[10] Candela F.: *New architecture*[8], *The Maillart Papers*, Billington D.P., Mark R., Abel J.F. (eds.), Princeton University, 1973, pp. 119-126. Also published in [6], pp. 178-180.

[11] Candela F.: "Notes for history: The development of thin shells in Mexico," World Congress on Shell and Spatial Structures, 20th Anniversary of the IASS, september 1979, *Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures*, nos. 71-72, december 1979-april 1980, pp. 27-38.

[8] Candela was dissatisfied with this title, which had been assigned by the Editors in advance of the conference. When he later published a translation of this lecture into Spanish for *En defensa del formalismo y otros escritos* (Bilbao, 1985), he re-titled it "La herencia de Maillart." [6, p. 178]

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Felix Candela: craftsman and precursor of contemporary technologies of thin concrete

Agostino Catalano
Prof. Ingegnere
Università degli Studi del Molise
Facoltà di Ingegneria, Italia

In ancient Greece, art was called τεχηε meaning high technical ability joined to an artistic vision. The technical and artistic aspect was considered inseparable, exactly like in the work of Felix Candela where the simplicity of the technical solutions has been the greatest characteristic in the masters production. Such simplicity was fruit of a technical wisdom that allowed him to judge which structure could be completed; translating the structural form in manifest composition of the static forces inborn in the material. Such constructive idea, confirmed by his refusal to fashion structures, lacking in sense and static truth, draws force from a vision of resistant forms that all the students know to be the carrying force of a generation of great designers and constructors such as Felix Candela, Pier Luigi Nervi, Eduardo Torroja, and others, that marked the happiest age of world-wide architecture reaching unexplored and unrivaled summits in the architectonic production in reinforced concrete. To such purpose it is necessary to say that Felix Candela, like other great masters, succeeded in such enterprise, becoming a part of those circles of great people that have always been ahead of their time with their theories in virtue of a spectacular "mental openness" that has allowed them to anticipate technical and artistic solutions that would characterize future times. In that sense, it can be said that the best technical solutions are derived from the careful study of nature, of the real world, where examples of "resistance by form" are found, far from too complex calculations, even if founded on necessary mathematical interpretations for the understanding of the phenomena, that taken as an example were adopted for the constructions.

Such position, which belongs also to Candela, starts from afar. In fact, the fundamental concept of the platonic philosophy is the vision of the reality as a copy of the "iperuranio," that is the world of ideas, where the true essence of the universe is enclosed. On the base of this concept, the platonic philosophy elaborates the refusal of art, meant as "copy of the copy" of the iperuranio. In the new-Platonism of the XIII century, art is still thought of as copy of nature but, in the vision of an artist like Michelangelo, it "is recovered." He, in fact, thinks that art is not a sterile imitation of nature but integral part of it. If we accept the principle of a circle of great forerunners, each in their time, of future events, the work of Felix Candela can be analyzed and characterized as that of other great protagonists of history of humanity.

The divine Michelangelo, in particular, was more creator of forms than constructor and as Giulio Carlo Argan said "... more than once he designed in order not to build..." Michelangelo, at the court of Lorenzo the Magnificent grew since his young age soaked in neo-Platonism that distanced itself from the theory of art as a synthesis between painting, sculpture and architecture that he pursued, but that was contested by Leonardo. He, conceived art as reflection of nature deriving from the scientific analysis of a world in continuous becoming from which useful technical indications for drawing of elevated artistic forms through a new appraisal of the technicality and the mechanicism. For Michelangelo, on the contrary, the past is reflected in Nature perfectly as all derives from God and art, also the future one, cannot be but a formal representation of that which is already present: it is not necessary to inquire in order to know and art, imitating the forms already inborn in nature, expresses itself already at its possible best.

Finally, the Michelangelo idea was that the forms of the built environment were tied to the existing principles of static force in nature, and therefore directly derived from God; consequently, the external forces had to confirm the force inborn in that natural equilibrium. The three fun-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 1)
The structure of the leaf

damental concepts, received from characters like Bramante and Raffaello, were: equilibrium, order, proportion. For Michelangelo, after all, forms were necessary characterized from that which had already been produced in the classic age and adapted to the new intentional artistic requirements from the artisan artist. Still Giulio Carlo Argan clarifies: "...The fact is that Michelangelo did not accept the classic distinction of construction and decoration: the second one was to the first as the first was to the space of nature. For Michelangelo, instead, between the dynamism of the carrying forces and the one of the visible embrasures there was not a deduction relationship, but of continuity or breach..."

It is a position of the artisan designer confirmed by Michelangelo's aversion for improvised craftsmen, manufacturing professionals who strain to find forced solutions to repeat without thought. It can be gleaned, from the writings and analyzing the work of Felix Candela, that also for his production artisan characteristics and not those of regimented professional for the creation of imaginative architectures and lacking in characteristics tied to the performance possibilities of concrete. It isn't possible not to find correspondence in the design exploration of Felix Candela with the static characteristics by shape of existing elements in nature. As an example, observing the structure of a leaf in order to find those conditions of resistance by shape that is the characteristic of his production. (F. 1)

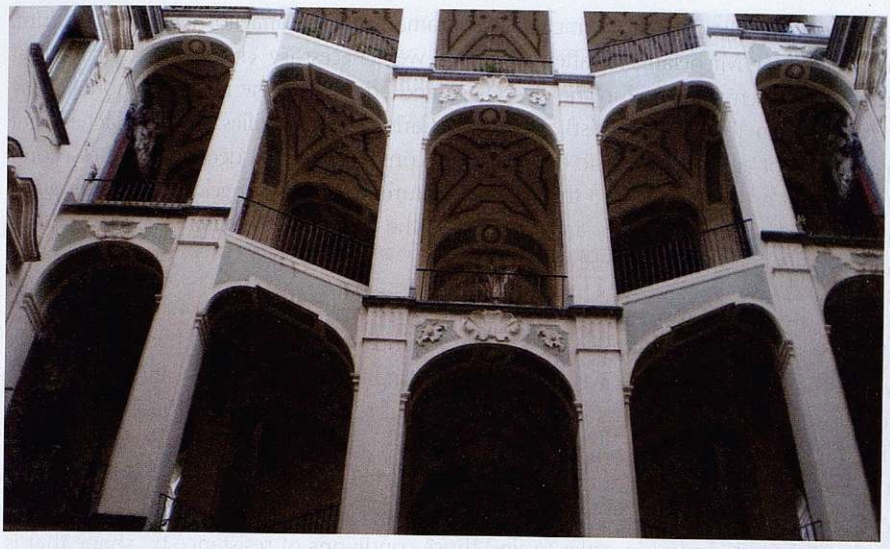
The leaf has a composite structure with an axis, which carries the other load bearing elements around which the full part is developed in a formal expression that derives exclusively from a structure perfectly capable to bear its own weight and the cutting action of the wind. No forcing is found, neither elements completely alien to the same form of the leaf that can be expressed in a variegated possibility of structure:

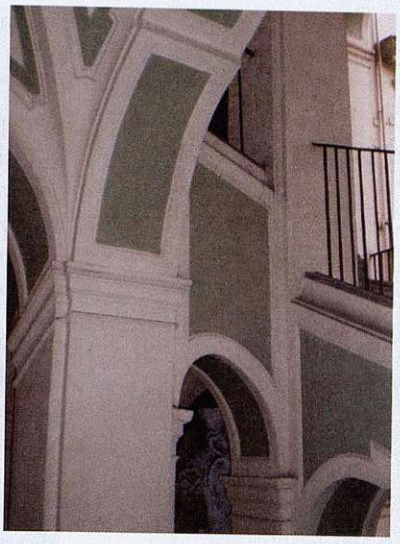
elliptic: apex and round base with the maximum width at the center
oval: maximum width in the third inferior part
roundleaf: maximum width in the third higher part
lanceolate: long and narrow foil
romboidal: rhombus form
heartshaped: round foil with cusped apex

In the ancient center of Naples they are some of the most beautiful structures of the seven hundreds. In particular, statics manifested by the stairs of the buildings of that period remain a wonder of aesthetics conveyed through resistance by shape. Such structures, very complex, were mainly the production of one of the greatest designers that Naples has ever had: Ferdinando Sanfelice. The stairs of Sanfelice are characterized by the advanced technique adopted differentiated by the use of barrel vaults with tilted axis to produce cantilever ramps with a minimal perpendicular curvature to the generating axis: the effect that derives is of lightness and structural daring. The technique is rendered also by the shrewd use of masonry assembly (in tuff stones) arranged, often, as herringbone bond in alternative to masonry assembly with stone elements parallel or perpendicular to the generating axis. The stones were tied with little mortar for a static resistance obtained fundamentalally through the geometric disposition of the blocks. The constructive technique thus realized has absorbed the increment of loads derived from earthquakes and eruptions of the Vesuvio. In the concept of the control of the resultants of horizontal and vertical loads in the kernel of inertia of the resistant section of the vertical elements, it is necessary to say that such equilibrium is rendered possible by the use of a natural stone like tuff, with the medium specific weight of 1,700kg/mc, that increases the stabilizing effect of the weight force. This explains also the renunciation to the use of lighter crafted bricks. The resistance, after all, is entrusted to the geometrical configuration and therefore to the masonry assembly adopted by the designer. (F. 2, 3)

The static boldness of the stairs of Ferdinando Sanfelice has been made possible solely by the high technological knowledge of the material and its possibilities. Such constructive wisdom, unique amongst the constructors of the age, did not find equals amongst the contemporaries who strongly doubted of the resistance possibilities of such structures refuted by the truth of a great capacity precursor of technical solutions to come. Also in the case of Sanfelice, the resistance by shape constituted the innovation. In the same way it is necessary to remember another great designer such as Vladimir Grigor'evic Shukhov. For the expo of Nizhi Novgorod of 1896 Shukhov designed and constructed eight pavilions in iron with light roofing to cover 27,000 square meters, a water tower with an hyperboloid structure that served as a model for

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 2)

Palace of the Spanish in the ancient center of Naples, the stair

(F. 3)

Palace of the Spanish in the ancient center of Naples, detail of the stair

others thirty analogous structures constructed in Russia and to thousands in the rest of the world. Shukhov is the author of innovative vaults in steel and glass of the GUM warehouses on the Red Public square of Moscow (1889-94) and those of the art museum of Puskin (1898-1912) and of the Petrovska gallery (1903-06) as well as the enormous metallic arches that form the covering vault of the train deposit (1908) and those of the Kievskiy station (1912-17). The colossal hall of the offices of the Centeral Mail of Moscow was covered in 1912 by a horizontal trelliswork structure that anticipates the special trellisworks developed from the beginning of 1940 by Konrad Wachsmann and Max Mangeringhausen.

In 1919, as requested by Lenin, Shukhov suggested, for the construction of the antenna of the state radio, a hyperboloid tower with nine sections for a total height of 350 meters. The tower then was constructed of six sections for 150 meters of height through the aid of an original telescopic assembly method. (F. 4) Nine years after, Shukhov constructed, near the river Oka, six trellises for high tension, 120 meters tall, in which he succeeded to improve further the ethereal lightness of these structures. "... It is necessary to invest in the search of new ideas. It was thus for the hyperboloid tower...": thus Shukhov said when asked about his design methodologies. Shukhovs work method, extremely modern and advanced of future times, was developed by successive approximations between the theoretical analysis of the problem, with the use of sophisticated differential equations, and the analysis of the practical feasibility for the resolution of the constructive and economic problems, until achieving technical perfection. In such sense, Shukhov created a school of engineering for the assembly of structures whose most famous example is the telescopic assemblage method for the hyperboloid towers, method applied also for the construction of the roofing of the Kiever station with three hinged reticular arches.

Shukhov in 1895 patented the first "net covering." The technology anticipated the use of simple metallic elements (flat 50-60 millimetre bars and light angle irons) assembled into rhomboidal meshes. For the first time, there was no distinction between main and secondary structural elements, and all elements had an equal role. Shukhovs designs were derived from an original synthesis of the theories of the mathematician Pafnuty Chebyshev of best functions approximations and non Euclidean geometry of the mathematician Nikolai Lobachevsky. Applying his analytical abilities to the double curving surface discovered by Lobachevsky called "hyperboloid," Shukhov obtains a family of equations that lead to the new structural and construction systems known as "rotation hyperboloids" and "hyperbolic paraboloids." The study of light weight metallic structures brought him to the mesh surfaces. Such surfaces can be distorted geometrically without losing their characteristic form and can be transformed with superficial continuities in other regular ones. It is the case of the rotation hyperboloids and the cylinder. In Shukhovs work the rotation hyperboloids play a special role being used also for the construction of towers in an incredible number of variations and for different uses.

At the end of the first decade of the twenty first century the industrial market offers a discreet range of concretes formulated, often, to specific requirements of the designers. To mention a

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

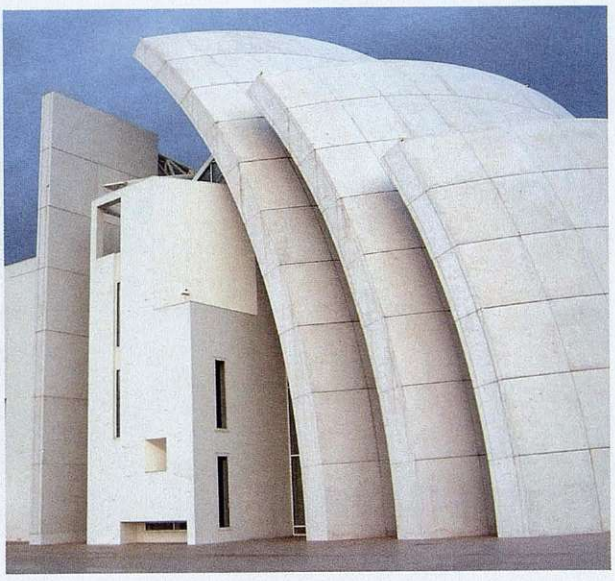
(F. 4)

Tower for the radius of state by Shukov

(F. 5)

The church Dives in Misericordiae by Richard Meier





remarkable example, the photo catalytic concrete used by Meier for the construction of the Dives Church of Misericordiae in Rome. (F. 5) New products of a poured material that can be synthesized in specialties of new consistencies, new expressivity, new performances like the self compacting concrete, high performances concrete, fibre reinforced concrete, textured concrete and other high technology concretes. In particular, the use of these concretes is aimed both at exceeding the formal expression limits of the material and the low resistance values with limited thickness for the creation of those products of architecture with high engineering value that has seen an architect artisan of structural engineering extraction such as Felix Candela mark permanently his age. The past years were surely marked by the work of Santiago Calatrava, but this is towards a structural design that the lamented University Professor Benedetto Colajanni, for years professor of Technical Architecture, recently deceased, defined in his introduction to the first sessions of the international conference *Technological Development of Concrete. Traditions, Actualities, Prospects*, in Termoli at the Faculty of Engineering of Molise, an architecture characterized by a "structural culture" very different from the one devised and produced by the afore mentioned masters. In virtue of such expressive possibilities of concrete, the achievable objectives are of three types: increase of the structural performances, the construction of resistant forms, and the improvement of the expressive abilities exposed cement facades.

Regarding the obtainable structural performance possibilities, the choices have pushed towards a varied range of solutions. For example, the Mercedes Benz museum of Stuttgart characterized by two curvilinear portals with variable inclinations, twists, support all loads on a 33 meters span including their own weight. The twists are connected only by the horizontal element that gives access to the museum. In the same way, the Tod's Tower of Tokyo is characterized by a structural covering that matches the load diagram. The creation of complex forms, such as Meyers mentioned church, is taken up also by other designers who experience the use of structures in order to create architecture. In some way, even if often on opposite positions, Santiago Calatrava creates his architectures through the use of structural members even if, in particular for the City of Science of Valencia, such formulation manifests in the thickening of beams and pillars, always spectacular, but independent from the resistance necessity that are abundantly compensated by the obsessive repetition of the planned and calculated structures. It is a different formulation that is far, in some way, from that which characterized the architectural production of Nervi, Torroja and Candela as can be established from the words with which Nervi "rejected" the TWA terminal of Saarinen in New York and the Opera House of Jørn Utzon in Sydney in the article "Architecture and Structuralism" published on *Casabella* in 1959. According to Nervi, the two important buildings are "... examples of the frankest static and constructive anti functionalism, consequence of the arbitrariness of the forms in clear contrast with the laws of constructive statics. The calculation and technical acrobatics can easily be imagined, and the waste of materials that will be necessary, even if it can be done without substantial modifications may as they be formal, in order to make them stand..."

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Also the formwork plays a fundamental role in the aesthetics of concrete. The traditional wood formworks has allowed the handcrafted modelling that has lead Felix Candela to an aesthetic improvement of exposed concrete facades in his works like in the covering of the church of the Miraculous Virgin in City of Mexico where through a suitable formwork a striped surface is obtained that raises the architectonic quality of the building. All these constructive characteristics, currently sought after in concrete, have been widely experienced and used by Felix Candela in his constructions achieving that slenderness of sections that today is a characteristic demand for the creation of suitable micro concrete to support strong loads with minimum structural sections. The search of the reduction of the wall effect and mix-design, aimed at controlling the water-concrete ratio with strong fluidity of the mixture, is found and intuitable in all the production of Felix Candela to obtain unique products, and therefore "masterworks," that have decreed the greatness and immortality of the idea. To such greatness, unfortunately, a painful period followed, that lasted till the seventies, that has seen the prevailing of those "professionals," so despised by Michelangelo, lacking in any design idea that have locked up the artistic production in formulas in order to calculate excessive sections that have invalidated any aesthetic progression. Until today, the return to the considerations that have characterized Felix Candela and the other protagonists of that extraordinary season also for the changed culture of the young generations of designers who have inherited the damage of the improvised craftsmen of architecture having denied the very essence of the constructive art: originality.

References

[1] Catalano A.: "Intervention techniques to improve seismic response of neapolitan historical stairs in relation to the new national seismic regulations", In atti del IX Congreso Internacional de Rehabilitacion del Patrimonio y Edificacion, Siviglia, luglio 2008.

[2] Capobianco M.: "Scale settecentesche a Napoli", in *L'Architettura. Cronache e storia*, 84, 1962.

[3] Muzi R.: *I disegni di Ferdinando Sanfelice al Museo di Capodimonte*, Napoli 1997.

[4] Gambardella A. (a cura di): *Ferdinando Sanfelice. Napoli e l'Europa*, Atti del convegno internazionale di studi (Napoli-Caserta 17-19 aprile 1997), Napoli, 2004.

[5] Argan G.C., Contardi B.: *Michelangelo architetto*, Electa, Milano, 1990.

[6] AA. VV.: *Vladimir Grigor'evic Shukhov: un ingegnere rivoluzionario*, in *Casabella*, 573, 1990.

[7] De Sivo B.: "Aesthetic of concrete," in Atti del I international Congress *Technological development of concrete. Traditions, actualities, prospects*, Luciano Editore, Napoli, 2009.

[8] Nelva R.: "Typologies of the reinforced concrete. Industrial buildings in North Italy at the beginning of the 20 th century: examples of Hennebiques system realizations," in Atti del I international Congress *Technological development of concrete. Traditions, actualities, prospects*, Luciano Editore, Napoli, 2009.

[9] Savorra M.: "Formalismo e filosofia delle strutture. Le architetture resistenti per forma nel pensiero di Pier Luigi Nervi e Felix Candela," in Atti del I international Congress *Technological development of concrete. Traditions, actualities, prospects*, Luciano Editore, Napoli, 2009.

[10] Faresin A.: "Architetture contemporanee in calcestruzzo. Esplorazione dei limiti strutturali, realizzazione di sagome complesse, sviluppo di superfici espressive", in Atti del I international Congress *Technological development of concrete. Traditions, actualities, prospects*, Luciano Editore, Napoli, 2009.

[11] Sicignano E.: "Structure-Architecture-Meangs: the church Dives Misericordiae Tor tre Teste –Rome (2001-2003) by Richard Meier," in Atti del I international Congress *Technological development of concrete. Traditions, actualities, prospects*, Luciano Editore, Napoli, 2009.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

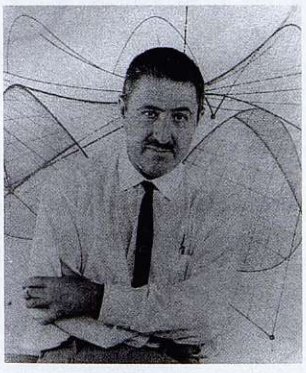
FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Felix Candela, Pier Luigi Nervi and formalism in architecture

Massimiliano Savorra
Prof. Architec. Università degli Studi del Molise
Facoltà di Ingegneria, Italia



(F. 1)
Pier Luigi Nervi



(F. 2)
Felix Candela

The Form-Resistant Structures and the Exhibitionism of Engineering during the Fifties

What is the form? Why do some animal, vegetable and mineral elements take their particular form in nature? How can the form meet structural needs? Felix Candela has examined several times the meaning of architectural work and specifically the role of the engineer who turns forms into concrete. Agreeing with Pier Luigi Nervi, (F. 1) Candela asserted that there is a strong connection between form and structure which overcomes the mere calculation; a relationship which can substantially change the idea of architectural space.

Concerning the connection between form and structure, the two great engineer-architects have often compared their thoughts in writings, lectures, articles, trying to explain that "building correctly" is the result of a complex operation in which all the involved elements have to play an important role in obtaining the beauty without using "soluciones extravagantes que están en desacuerdo con las inmutables leyes de la estática."[1] Candela (F. 2) gave Nervi the role of a recognised teacher who began studying the original architectural forms by means of his experiments and had opened, with his authoritative voice, the international debate on the incorrect use of innovation in the structural field. As a matter of fact, identifying the crux of the matter, which for the following years would have animated the controversies among architects and structural engineers, Pier Luigi Nervi wrote on the review *Pirelli* in 1951: "Non è entusiastica esagerazione il prevedere che proprio nell'aver iniziato queste nuove forme, così strettamente legate alle qualità tecniche delle strutture cementizie armate, gli studiosi del futuro sintetizzeranno il travaglio architettonico della nostra epoca."[2]

By the late forties and the early sixties, in fact, in an extraordinarily productive season for the expressiveness of the great works (mostly bridges and roofs), the fortune of form-resistant structures in the international architectural scene is a complex and significant phenomenon. Following the reflections and the rhetoric on the use of reinforced concrete at the beginning of the twentieth century,[3] the attention towards the concept of "surface structure" applies to the concrete

This essay is part of a larger study on formalism in architecture and on the relationship between engineers and architects in the fifties. Some advances have appeared in *Formalismo e filosofia delle strutture. Le architetture "resistenti per forma" nel pensiero di Pier Luigi Nervi e di Felix Candela*, published in Concrete 2009. *Evoluzione tecnologica del calcestruzzo. Tradizione, attualità, prospettive*, Proceedings of the conference (Termoli 19-21 February 2009), Luciano Editore, Naples 2009, pp. 93-102, and *Felix Candela e la "difesa del formalismo"*, forthcoming in A. Catalano (ed.), *The Art of the building*, acts of the fourth series of seminars dedicated to *Razon y ser de los tipos estructurales* (Termoli, 23 January 2009), Luciano Editore.
I wish to thank Agostino Catalano for his interest in my research.

[1] F. Candela, "La obra de Pier Luigi Nervi", conferencia leida en el Instituto Nacional de Bellas Artes, Mexico, 1964, in Id., *En defensa del formalismo y otros escritos*, Xarait, Bilbao, 1985, p. 158.

[2] P.L. Nervi, "La 'resistenza per forma' caratteristica statico-architettonica del cemento armato", in *Pirelli*, a. IV, august 1951, p. 11.

[3] See A.M. Zorgno, "Oltre la prigione cubica", in *Rassegna*, 49/1, march 1992, pp. 74-83.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

curved slabs and the interest in new spatial forms increases with the understanding that the characteristics of these new materials let the imagination run free and experiment forms only theorized so far. Laminar curved roofs, form-resistant shells, saddle surfaces and hypar forms (hiperbolic paraboloids) are hypothesized on paper and are put immediately into practice with risky elaborations, also thanks to the flourishing relevant scientific contributions.

Developed by Robert Maillart in the early part of the century, the shell-structures, during the post second world war, start the testing of complex rotation bodies, form-resistant with double curves and with a perfect balance of strengths without lateral forces. Furthermore, thanks to Maillart's lessons and to Eugene Freyssinet and Eduardo Torroja's examples, thin shell concrete structures started to be applied in Europe even for building large-scale works; also favoured by the theoretical researches and by the advanced studies of the Italian school.[4] Specifically, after the second world war, in Italy, the combination of reconstruction and infrastructure plans within the territory and together with extraordinary programmes of events such as Rome Olympics (1960) and the celebration of Turin as Capital (1961), encourages the beginning of interesting engineering works considered from the point of view of both construction and formal experimentation.[5] (F. 3) As a result of the collaboration of structurist-engineers and architects, such high quality works were permitted thanks to the research of acknowledged figures such as Arturo Danusso and Gustavo Colonnetti.[6] In addition to those by Pier Luigi Nervi, works by other engineers should be mentioned, such as those by Silvano Zorzi, Riccardo Morandi, Sergio Musmeci, Franco Levi, Carlo Cestelli Guidi.

In this period, a structural and formal exhibitionism, evident in the creation of works characterized by plastic trends, opens a dispute during the fifties on the idea of "architecture."[7] Ernesto Nathan Rogers, for instance, harshly criticized the section on *Structure* of the Triennale of Milan of 1957 dedicated to fundamental, technical and constructive aspects of forms "considerate idealmente e in astratto."[8] The severe criticism of Rogers referred to an event that celebrated, in one of the two areas in which was divided the exhibition, the history of the "Structure," as Agnoldomenico Pica wrote, considered as an essential element of architecture "che, al di là della sua funzione tecnica, induce nella fabbrica una qualità, anzi proprio un 'modo di esistere' che, assimilando il linguaggio della critica pittorica, potremmo indicare con l'espressione "forma struttura."[9]

The following year Frei Otto made similar observations regarding the forms adopted in the pavilions at the Brussels Expo, which took place in 1958, from April 17th to October 19th.[10] In the Belgian city, the exhibition of structural engineering, in tune with the main idea of the deve-

[4] Recently see M.A. Chiorino, "Filosofia strutturale: Jürg Conzett e l'eredità di Torino", in J. Conzett, *Architettura nelle opere ingegneria*, edited by M. A. Chiorino, Umberto Allemandi & C., Turin 2007, pp. 51-64; and the contibutions of S. Poretti, T. Iori, R. Nelva, B. Signorelli, C. Greco, M. Marandola, C. Chiorino, R. Capomolla, M. Zordan, in *Ingegneria italiana*, monographic issue of *Rassegna di architettura e di urbanistica*, 121-122, january-february 2007.

[5] About the Italian case see the important studies of Sergio Poretti. In particular, the end of, "Un tempo felice dell'ingegneria italiana. Le grandi opere strutturali dalla ricostruzione al miracolo economico", in *Casabella*, 739-740, 2006, pp. 6-11; e *Modernismi italiani. Architettura e costruzione del Novecento*, Gangemi, Rome 2008.

[6] On Colonnetti's works, see P.P. Peruccio, *La ricostruzione domestica. Gustavo Colonnetti tra cultura politecnica e industrializzazione (1943-1957)*, Celid, Turin, 2005; T. Iori, "Il boom dell'ingegneria italiana: il ruolo di Gustavo Colonnetti e Arturo Danusso", in S. D'Agostino (edited by), *Storia dell'ingegneria*, proceedings of II National meeting, Napoli 7-9 april 2008, Cuzzolin, Naples 2008, vol. 2, pp. 1501-1510.

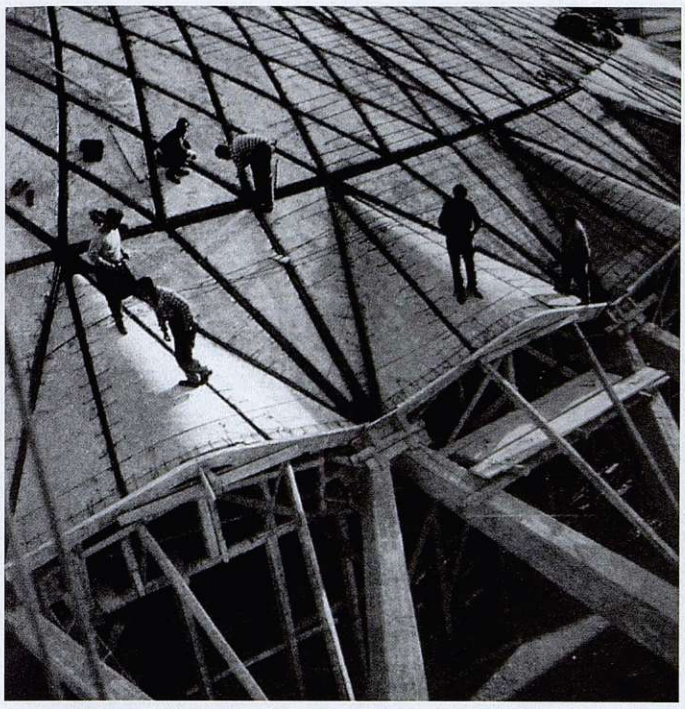
[7] Not by chance, for example, following Zevian theory about the lack of architectural spatiality without an internal space, in 1955 Breda pavilions, designed by Luciano Baldessari for the Fiera of Milan, were interpretated in their original forms as architectures that had overtook the limits of architecture entering in the sculpture field. See M. Savorra, *Capolavori brevi. Luciano Baldessari, la Breda e la Fiera di Milano*, Electa, Milan, 2008, p. 8.

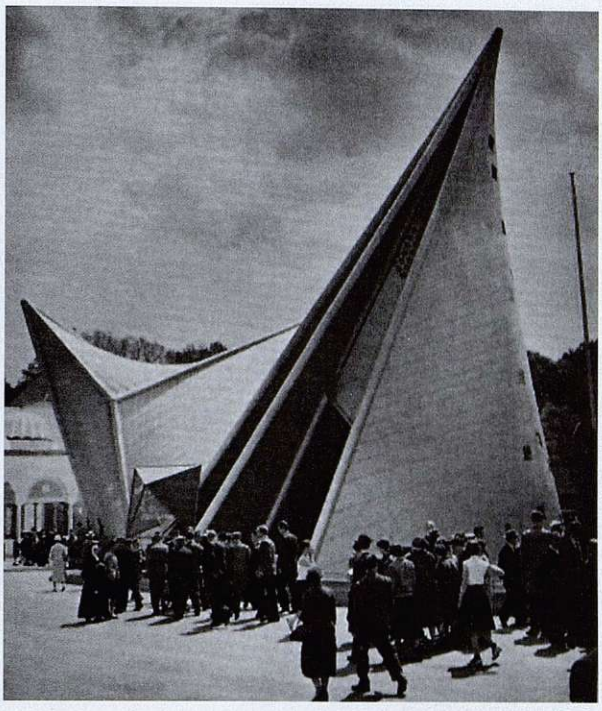
[8] E.N. Rogers, "Utilità e inutilità della Triennale", in *Casabella Continuità*, 217, december-january 1957-58, p. 3.

[9] A. Pica, "Unidicesima Triennale", exhibition catalogue, Milan, 1957, pp. 31-32, cit. in A. Pansera, *Storia e cronaca della Triennale*, Longanesi, Milan, 1978, p. 429.

[10] See F. Otto, "Formes, techniques et constructions humaines", in *L'Architecture d'Aujourd'hui*, 78, 1958, p. 4.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 3)
Pier Luigi Nervi.
Palazzetto dello Sport, Rome, 1956

(F. 4)
Le Corbusier.
Philips Pavilion, Brussels, 1958

lopment of science and technology, was the characterizing element of an event in which the splendour of atomic age was magnified. Among many pavilions which showed off the relationship between form and structure through hypar surfaces, the famous Pavilion Philips, designed by Le Corbusier with Iannis Xenakis, stood out with its ribs in pre-compressed concrete and strained steel structures designed for supporting large hyperbolic paraboloids split into parts of about one square meter each, cut in the form of an irregular grid by crossing of the generators with the lines.[11] (F. 4)

In 1960, Reyner Banham commented in an article the sincere respect shown by many critics, "una stima quasi feticistica," towards some engineers as Nervi, Candela and Torroja, who obtained "uno status senza precedenti, sia come collaboratori di architetti, che come ideatori di forme da imitare."[12] In 1961, in the preface to the second edition of his successful *Space, time and architecture*, Sigfried Giedion noted – wondering why – how architecture was recently closer to sculpture and vice versa, in a changed relationship of forces between internal and external, full and empty, in and the out. Not only the chapel at Ronchamp by Le Corbusier, but also the Sydney Opera House by Jørn Utzon or the Tokyo Metropolitan Festival Hall by Kunio Maekawa were intended by Giedion as a new interpretation of internal and external spaces continuously linking themselves and with the surrounding landscape. So, in this correlation between *Innen* and *Aussen*, the covering system, which has always been a symbol and a reflection of the times in which it had been produced, assumed a decisive value. Also favored by low-cost skilled labours, the covers designed by strutturalist engineers in that specific season allowed to refine the interpretation of the space to cover and to materialise the dreams, only outlined on the paper by architects so far. The complex curves drawn on paper could take form like rough-casts carved by genial sculptors, with a technical ability to dominate many spatial levels.

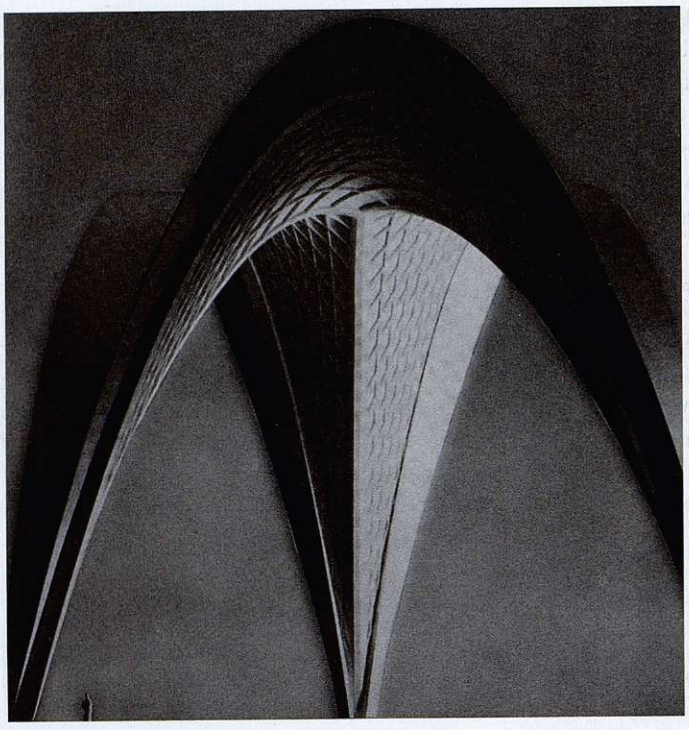
Pier Luigi Nervi and the Static Intuition

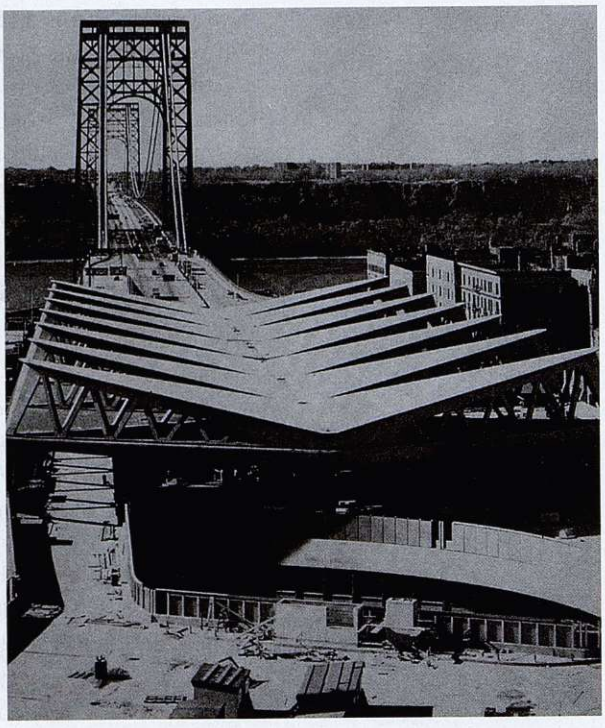
In 1951 Nervi published his article to explain that among many qualities of the reinforced concrete and "ferro-cemento" there is the possibility to recognize curved or corrugated resistant sur-

[11] A. Capanna, "Le Corbusier. Padiglione Philips, Bruxelles", Testo & Immagine, Turin, 2000, p. 50.

[12] See R. Banham, "1960 – Inventario dell'impatto della tradizione e della tecnologia sull'architettura d'oggi", in id., *Architettura della Seconda Età della Macchina. Scritti 1955-1988*, edited by M. Biraghi, Electa, Milan, 2004, p. 74 (the article appears for the first time in *Architectural Review*, 127, february 1960, pp. 93-100).

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 5)

P. L. Nervi, A. Nervi,
F. Vacchini, C. Vannoni.
Study Model of the Cathedral.
New Norcia, Perth, 1958

(F. 6)

P. L. Nervi.
Autostazione, Washington Bridge.
New York, 1961-62

faces. According to the Italian engineer, this specific quality "porta alla possibilità di strutture nelle quali la capacità statica è diretta conseguenza di curvature o corrugamenti dati ad una superficie, il cui spessore resta sempre molto piccolo rispetto alle dimensioni dell'organismo resistente. In altre parole l'efficacia statica è frutto più della forma della struttura e di una sua diffusa attitudine resistente, che non da concentramenti di azioni agenti e di sezioni resistenti lungo singoli elementi. È certamente difficile dare una definizione di questi particolari sistemi che suggerirei di chiamare "resistenti per forma" per quanto natura e manufatti di uso comune ce ne offrano, quotidianamente, numerose applicazioni."[13]

With the attitude of a "gothic architecture builder," as Pica notes, Nervi states the necessity to express spaces suitable for the function, and "significanti di quel mondo spirituale senza di cui qualsiasi fisicità sarebbe destinata a sparire."[14] Even if agreeing with the complexity of the academic debate about the systems of forces in the form-resistant structures, Nervi claims the importance of experiments (as often does in his writings related to other models,)[15] since it is possible, for the first time, to use these structures for building very large scale works. Trusting that building science would make progress and sure of the success of experimental investigations, the famous engineer claims that "la vera difficoltà da superare, per raggiungere quello sviluppo delle strutture resistenti 'per forma' da cui dipende in così grande misura il progresso del costruire, è nella generale deficienza di intuizione statica ed architettonica corrispondente a questi particolari sistemi e nella difficoltà del formarla."[16]

In the same article Nervi explains that examples existing in nature were too minimal for allowing direct static experiments. He mentioned chalices of flowers, lanceolate leaves, reeds, eggs and insects shells, fans, lampshades, glass jars and hats as examples of form-resistant structures. According to the Italian engineer, such "resistance," while being the most efficient among all those existing in the natural world, it has not been included in the unconscious static intuition

[13] P.L. Nervi, "La 'resistenza per forma'...", cit., p. 11.

[14] A. Pica, *Pier Luigi Nervi*, Editalia, Rome, 1969, p. 14.

[15] See P.L. Nervi, *Costruire correttamente. Caratteristiche e possibilità delle strutture cementizie armate*, Ulrico Hoepli, Milan, 1965.

[16] P.L. Nervi, "La 'resistenza per forma'...", cit., p. 12.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

from which patterns and structural projects derive from. By the time his international reputation of his structures was being recognised, Nervi, in his "seconda vita," (according to Sergo Poretti's words) sees the huge potentiality of thin concrete surfaces based on the use of form resistance. (F. 5, 6)[17] Not by chance, before concluding the article with a dissertation on the first realization of thin vaults in simple form and on structures proposed by Aldo Arcangeli, a collaborator in technical office of the Società Ingg. Nervi & Bartoli, Nervi stated "non siamo ancora abituati a pensare staticamente per forma."[18]

Felix Candela and "New Expressionist" Architectures

Nervi's statement is soon refuted by Felix Candela. In fact, as "structural artist" and "master builder of shell structures,"[19] Candela represents some of the most significant aspects of the architectural culture of the late twentieth century. As Eduardo Torroja and Pier Luigi Nervi, he was designer, consultant, accountant, contractor, and then, builder (activities that qualify his role of "creator of extraordinary forms" in the composite panorama of international architecture.)[20] Designer of heretical laminar structures, Candela was considered by Bruno Zevi "ingegnere-architetto-scultore,"[21] one of the representative figures of the "new-expressionist tendency" of the fifties,[22] besides Hans Scharoun, Eero Saarinen, Jørn Utzon e Oscar Niemeyer. On the other hand, in 1959, Ernesto Nathan Rogers introduced him in *Casabella* as one of the most famous engineers in the world, able to "risolvere i più ardui problemi statici."[23] Therefore, Candela was considered an excellent structurist not only for his facility to solve difficult structural problems but also for his ability to combine technical intuition with philosophical thought, an attitude developed since the early years in Madrid,[24] where he met Jose Ortega y Gasset in 1934.

Candela was very attracted by Ortega's philosophy, in fact, he will often recall the philosopher's thought in his writings. Ortega's ideas expressed in *La deshumanizacion del arte* will strongly influence Candela's paper entitled *Hacia una nueva filosofía de las estructuras* presented at the II Mexican Scientific meeting[25] while Nervi published his article. Furthermore, in the meantime, inside Mexico City university campus – a place considered the symbol of emancipation and

[17] S. Poretti, "Nervi che visse tre volte", in T. Iori, S. Poretti, *Pier Luigi Nervi. L'Ambasciata d'Italia a Brasilia*, Electa, Milan, 2008, pp. 18-36.

[18] P.L. Nervi, "La 'resistenza per forma'...", cit., p. 12.

[19] H. Isler, "Shell Structures: Candela in America and Waht We Did in Europe", in G. Nordenson (ed. by), *Seven Structural Engineers: The Felix Candela Lectures*, The Museum of Modern Art, New York, 2008, p. 87.

[20] See K. Frampton, *Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture*, MIT Press, Cambridge (Mass.)-London, 1995 (see translation Skira, Milan, 1999, p. 369).

[21] [B. Zevi], "Gittate di luce e di cemento. Architetto Felix Candela", in *L'architettura. Cronache e storia*, june 1956, p. 116. In the article it is quoted Giovanni Maria Cosco's essay, appeared on *Arquitectura Mexico* 52, in which Candela creativity is compared to relativistic and spatial sculpture and Candela's writing "Stereo-structures" appeared in june 1954 on the review *Progressive Architecture*.

[22] B. Zevi, *Storia dell'architettura moderna*, Giulio Einaudi, Turin, 1950 (in new edition of 1984, p. 386). Also see H.R. Hitchcock, *Architecture: Nineteenth and Twentieth Centuries*, Penguin Books, Harmondsworth, 1958, 1968 (see translation Giulio Einaudi, Turin, 1971, 1989, p. 568).

[23] E.N. Rogers, F. Candela, "Strutture e strutturalismo. Una lettera di Felix Candela", in *Casabella*, 232, october 1959, p. 48.

[24] As it is known, because of his political and personal misfortunes, Candela gave up studying, he had won a scholarship in 1936 at the Academia de Bellas Artes de San Fernando with a project dedidated to *Influence of the New Techniques of Reinforced Concrete in Plastic Architecture*, he was forced to exile in 1939 in Mexico, where, however, he had the possibility to improve his studies creating, with Fernando and Raul Fernandez Rangel, a building company Cubiertas Ala. His archive is held in Dept. of Drawings & Archives, A very Library of Columbia University Libraries di New York. Most biographical details derived from the recent book of M.E. Moreyra Garlock, D.P. Billington, *Felix Candela. Engineer, Builder, Structural Artist*, exhibition catalogue, Yale University Press, New Haven and London, 2008.

[25] F. Candela, "Hacia una nueva filosofía de las estructuras", in *Revista ingeniería*, 25, n. 2, july-august 1952.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

secularization of the State intervention –[26] Candela creates his first example of a hyperbolic paraboloid, the saddle roof of Pabellon de Rayos Cosmicos designed by Jorge Gonzalez Reyna, a double curve vault conceived to ensure the necessary rigidity and a minimum thickness.

Since 1951, focusing on the principles of statics and geometry of Fernand Aimond and Eduardo Torroja,[27] Candela improves the study of functioning of "cascarones" shell, building complex vaults, prismatic corrugated plates, reverse umbrella roofs, conoid and elliptical domes, approximately covering the full range of geometric forms. Candela was interested in double curve surfaces, conceived to obtaine an extremely thin thickness, as it is shown in the asymmetrical hyperbolic paraboloid vault created for a garage at El Pedregal (in cooperation with Horacio Almada, 1952), in the cylindrical vaults of Customs Warehouse (with Carlos Recamier, 1952), and in the asymmetric umbrella shelter created for the Ciba Laboratories (with Alejandro Prieto 1952-53), all of them built in the Mexican capital. (F. 7) According to Nervi's lessons, Candela proves how wide surfaces could be covered with an elementary based-form "persino uno stadio – as Giovanni Klaus Koenig wrote – semplicemente per aggregazione e trasformazione continua di pochissime forme semplici, tutte resistenti solo in virtù della loro forma, e perciò ottenibili con spessori di calcestruzzo addirittura incredibili: fino a un centimetro e mezzo!"[28]

The architectures built during the fifties in cooperation with Candela were inspired by the structural organization of natural forms – flowers, leaves, shells, bones – in line with the research of the so-called "techno-organic" movement, which made its first dèbut at the exhibition *Growth and Form* arranged in London in 1951 to honour D'Arcy Thompson,[29] who had repeatedly dealt with the issue until the publication of the book *On Growth and Form.*[30] Therefore, the groined vault roofs, as in the nightclub La Jacaranda of the Hotel El Presidente in Acapulco (F. 8) designed by Juan Sordo Madaleno (1957), or the complex saddle structures, as in the famous restaurant Los Manantiales in Xochimilco (F. 9) designed by Joaquin e Fernando Alvarez Ordoñez (1958) or as in the chapel of San Vicente in Coyoacan designed by Enrique de la Mora Palomar and Fernando Lopez Carmona (1959), are the expression of a technical ability that, firstly, derives from the debates on the relationship between form and structure matured during the spanish years and from the philosophic studies of his early years, secondly, are inspired by the international architectural culture, in tune with the experiments of structurist engineers who consciously have an "inclination for form." "Nel costruire – Candela states – siamo arrivati, fortunatamente, al termine del lungo momento dell'analisi. Le idee che ci hanno servito hanno raggiunto il loro sviluppo completo e sarebbe assurdo continuare a sfruttarle, se v'è da credere ai sintomi, noi siamo alla vigilia di una nuova epoca creativa. Gli architetti dovrebbero compiacersene, se intendono riprendere il loro ruolo di costruttori poiché per costruire forse non sarà più necessario possedere tanta scienza quanto avere talento e intuizione."[31]

The Defence of Formalism

Static intuition as desired by Nervi, and so hard to define – as Giulio Pizzetti reminded in 1957[32] – in his analytic implications was, for the Spanish architect-engineer, the starting point of every constructing method. However, intuition was not enough to explain something approaching artistic creation. Communicating to readers and students, as Nervi used to do, "el misterio" of his working method was considered a pointless strategy by Candela: "Hay cosas que no se pue-

[26] W.J.R. Curtis, *Moderne Architecture Since 1900*, Phaidon Press, London, 1982 (see translation Bruno Mondadori, Milan, 1999, p. 494).

[27] On Torroja 's thought see F. Levi, M.A. Chiorino, C. Bertolini Cestari (ed. by), *Eduardo Torroja. From the philosophy of structures to the art and science of building*, Franco Angeli, Milan, 2003.

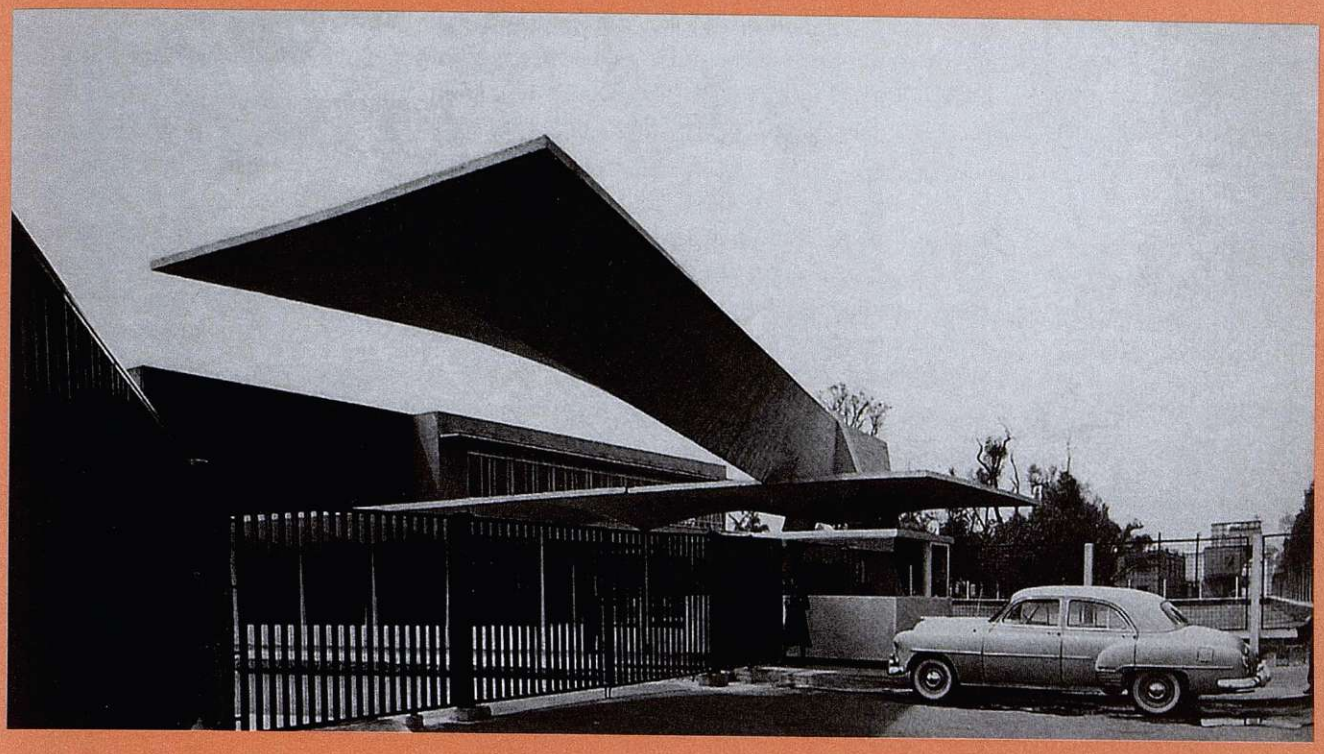
[28] G.K.K., "Un pubblico per Candela", in *Casabella*, 347, aprile 1970, p. 7.

[29] See M. Bonaiti, *Architettura è. Louis I. Kahn, gli scritti*, Electa, Milan, 2002, p. 12.

[30] D'Arcy Wentworth Thompson's works, a Natural history teacher at University College di Dundee and then at Saint Andrews University, see the edition edited by John Tyler Bonner (Cambridge, 1961) in the Italian version *Crescita e forma. La geometria della natura*, Bollati Boringhieri, Turin, 1969.

[31] The quotation is in "Breve documentario di Felix Candela", in *Domus*, 319, june 1956, pp. 3-5.

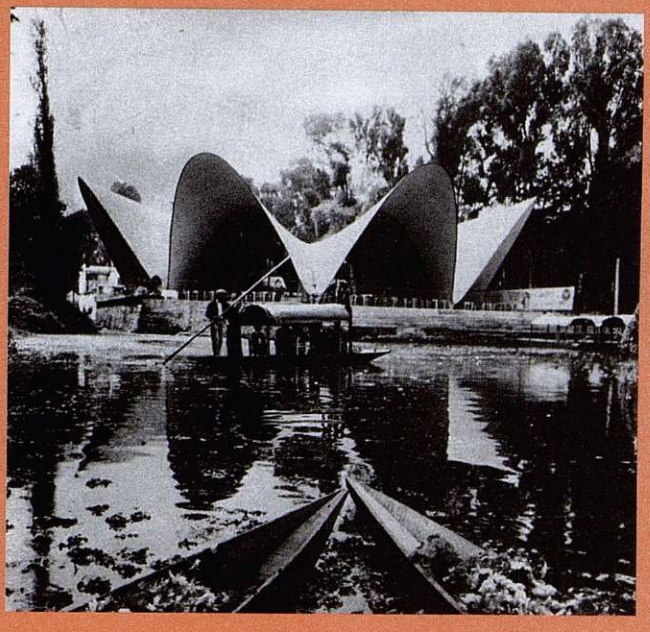
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 7)



(F. 8)



(F. 9)

(F. 7)

A. Prieto, F. Candela
Lederle, Mexico D.F., 1956

(F. 8)

J. Sordo Madaleno, F. Candela
La Jacaranda Nightclub, Acapulco, 1957

(F. 9)

F. Candela, F. Alvarez Ordonez
Restaurant Los Manantiales, Xochimilco, 1958

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

den enseñar" he used to say. Not by chance, concerning Nervi, he wrote: "Sus estructuras no son bellas porque se ajusten a las leyes físicas, sino porque su autor es uno de los más grandes artistas de nuestro tiempo."[33]

Creation and form construction were indivisible phases: in fact, in 1956 Candela presented a report entitled *Defensa del formalismo* at the Sociedad de Arquitectos of Mexico. Invited to describe two churches, one completed and the other work in progress, and to illustrate structural problems he managed to solve,[34] he takes advantages of the situation and speaks about forms in architecture, taking part in the ongoing debate among the most important international critics concerning the exaggerated use of bold geometric forms and technical spectacularity. In his lecture, Candela examines the meaning of the form: "O, mejor dicho, ¿qué significación tiene ahora la palabra forma y qué ha significado en el pasado?"

Beginning with the statement: "form is the quality that makes everything what it is," he thinks that all sciences, like philosophy, can be considered as an attempt to study the form of things and discover the fundamental principle which can explain its existence. After reflecting on the meaning of the word "form" (as well as on the adjective "formalist") which has changed throughout the years and on a vain attempt to replace the term with the word "plastic," inappropriate and poor in expressiveness, Candela says that "llegado el momento de reivindicar el noble y ancestral significado del vocablo que nos ocupa y, adelantándonos a los acontecimientos, definir Formalismo como la investgación científica de la configuración espacial, sin dejar de incluir el análisis detallado de la estructura interna."[35]

Recalling Jose Ortega y Gasset's thought, organicism, the precepts of atomism, and certain philosophical principles about the world as a system of systems or as a whole of congruent structures, he declares that the problem of "real science" is like that of "artistic creation," and both require knowledge as an essential experience in the creative process. According to Ortega, mentioned several times in Candela's writings, the human being becomes man, when he has the need to know, to search for the truth and the meaning of reality. Science is essential to life, but when the discrepancy between scientific experiment and the result given is too much (the only function that justifies science), it becomes "un vicio y nada más." It is, thus, unacceptable the gap in many sciences – according to the Spanish philosopher's thought quoted by Candela – between discipline and accuracy used for achieving data and the vagueness, or even worse, the lack of intellectuality used in constructive ideas.

Consequently, in science, the principle of truth can be associated to that adopted in the art, but, as for Ortega opinion, truth must be achieved without orientating towards a single perspective (the multiplicity of perspectives, it should be reminded, according to the perspectivism of Ortega, allows a point of view closer to "true" reality,) also Candela believes that many circumstances and many requirements are to be taken into account for obtaining a form. On several occasions, Candela does not justify the wild "Baroquism" and the obsessive pursuit of originality of the late years, as long as he calls "bochornoso espectáculo" the recent evidence of a "decrepit" Le Corbusier, guilty, in his opinion, of attempting to emulate "las insensateces a veces geniales" of his disciple Oscar Niemeyer.

A Philosophy of Structures

For Candela, as well as for Nervi, the form cannot be arbitrary, but must satisfy prerogatives – some of which impossible to define with logic and analytic mechanisms – such as those of aesthetic and of structure, which Candela believes among the most important. If the former are impossible to quantify, the latter demonstrate the limits of analytical technique: calculation – he

[32] See G. Pizzetti, "Intuizione e linguaggio analitico nell'ingegneria e nell'architettura", in *Casabella Continuità*, 216, october-november 1957, pp. 50-52. By the same author also see "Un maestro delle strutture: Eduardo Torroja", in *Casabella Continuità*, 217, december-january 1957-58, pp. 89-91.

[33] F. Candela, "Comentario a una ponencia de Nervi. Congreso de la Union de Arquitectos", London, 1961, in Id., *En defensa...* cit., p. 154.

[34] Text of lecture is in F. Candela, *En defensa...* cit., pp. 21-30.

[35] F. Candela, *En defensa...* cit., p. 24.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

writes - is not able to give form to a structure, it can only split the form up. He clarifies that the solution can be found in the "síntesis" which our mind "racional y consciente" is not able to perform, but it is determined by "intuición." In this sense, Candela gives a definition of structural intuition and, in the meanwhile, an explanation of its mechanisms: the creation, the imagination and the invention, as unconscious human activities which interact with each other, are aspects of a process that can be called "descubrimiento."

"Descubrir" is for Candela to reveal what is hidden from our eyes and our mind, "es darnos cuenta de lo que nos rodea y de lo que hay dentro de nosotros."[36] We know very little about the unconscious mental process at the origin of creative, imaginative and inventive abilities, he says, and such abilities aim to simplify and to abstract: every single detail or element of the surrounding world, as for him, undifferentiated and chaotic, it must be emptied by what is considered as random and, mentally "clean," must be reduced to pure essence. In this sense, he thinks, we can declare to know the above mentioned element.

According to Candela, the form is not a simple matter of decorum, as, by itself, math does not produce the perfect shape. On the contrary, the target of numerical analysis is, for him, to reduce and classify the elements, in order to assemble them together again in harmony, "en una forma feliz," a process corresponding to the intellectual path that is needed in Art. However, form has a frame that changes according to the point of view, and to understand the true shape of an object it is necessary to reconstruct mentally "representación descriptiva que nos aclara su significación."

It must be clear that what we look at,z it is not truly as it is, we need to transform such visual images through the cognitive mechanisms described by Ortega and, as Candela recalls -analyzed by psychological school of Gestalt. The approach of scientific theories and philosophical principles to the "arte de la estructura o de la construcción" gives a definition of what the engineer means by "architecture." Functional limits, among which he includes the structural and aesthetic, become, for Candela, essential for a drawing of a project. For this reason, he is sure that such limits should be imprinted in the subconscious, the only "mecanismo mental capaz de ejecutar eficazmente, y sobre todo con la rapidez requerida, el complicado proceso de ajuste que nos produzca como resultado una forma condicionada por todos los requisitos previos."

In 1957 Eduardo Torroja, in his *Razón y ser de los Tipos Estructurales* speaks about the relationship between form and structure in architecture. This text can be related to Candela's work and thought. Translated into English and published in the United States the following year, the Spanish engineer's publication achieves a significant success, as far as in 1966 an Italian edition is edited by Franco Levi. With a relevant contribution to the "modern philosophy structural," Torroja expresses his thoughts on the intuitive interpretation of the static behaviour of structures, which, in his opinion, should be the beginning of any teaching methodology, as well as the main source of inspiration for projecting activities and applied scientific research.[37]

Identifying a common language for interpreting the form, which is suitable for specialists involved in the project, is very important - as Levi says in the preface to the Italian edition of 1966 of Torroja's book - in order to avoid the reduction of the engineer's role in technical specialist of calculating schemes for projects of complex structures. Pointing at a new route to follow for realizing forms and structures which could be the synthesis of a cultural value, in other words, the true "fusione di materia e poesia" in the late fifties - when architectures come out, such as the above mentioned Pavilion Philips of Le Corbusier at the Exposition in Brussels, - Torroja, Candela and Nervi's texts and works focus their attention on the use of hypar forms, a topic which soon becomes much-debated.

Forms and Structures: Polemics and Debates

During the years of the economic boom the "corretto costruire," as Ernesto Nathan Rogers wrote on the pages of *Casabella* in 1959, begin to collide with the "sfrenato strutturalismo, dove il mezzo

[36] Ibidem, p. 27.

[37] See F. Levi preface to the italian edition of E. Torroja, *La concezione strutturale. Logica ed intuito nella ideazione delle forme*, Utet, Torino, 1966; cit. also in F. Levi, *Cinquant'anni prima. Dalle rovine belliche alle costruzioni funzionali*, Testo & Immagine, Turin, 2003, p. 75.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 10)
Article *Casabella*, 229, july 1959



Architettura e strutturalismo

E. N. Rogers e P. L. Nervi

tecnico si riduce a un mero gioco esibizionistico e perde ogni concretezza." It has to be said that the problem of the relationship between technique and expression had been the central interest of the magazine for years and since 1959 it has dealt with in Nervi's column "Critica delle strutture."[38]

The event which provokes the debate is provided by the TWA Terminal in New York by Eero Saarinen and the Sydney Opera House by Jørn Utzon. (F. 10) Both projects are judged by Nervi as "esempi del più schietto anti-funzionalismo statico e costruttivo, conseguenza della arbitrarietà delle forme in netto contrasto con le leggi della statica costruttiva. Si possono facilmente immaginare le acrobazie di calcolo, di tecnica, e lo sperpero di materiali che saranno necessari, se pure ci si riuscirà senza sostanziali modiche anche formali, per farli stare in piedi."[39] In Nervi's opinion, technical accuracy is a fundamental requirement for a large structure, rather, as he used to write, "una indispensabile premessa della bellezza architettonica." Perception and static awareness, present in the examples of the past he had studied, were with their equilibrium at the base of the concordance between constructive perfection and architectonic expressiveness. His argument was directed towards those works characterized by false and artificial structures, which can be defined, as for Nervi, as "anti-structuralism examples." Referring to Bruno Zevi, and the polemics appearing in the review *L'Architettura* edited by him,[40] Nervi stresses the difference between "formalism"

[38] See P.L. Nervi, "Critica delle strutture", in *Casabella Continuità*, 223, january 1959, p. 55.

[39] P.L. Nervi, "Architettura e strutturalismo", in *Casabella*, 229, july 1959, p. 5. See also Nervi's article published few months before "Rapporti tra ingegneria e architettura", in *Casabella*, 225, march 1959, p. 50.

[40] In Bruno Zevi's review *L'Architettura. Cronache e Storia* there was a survey "Strutture" which was used to deal with technical aspects and the relationship between form and structure. This part of the review is assimilated, from the beginning of may 1960 in the section "Costruzioni" "to underline that the separation between technical and expressive interests in not acceptable any long." Among the articles the most relevant are S. Musmeci, "Volte ad archi poligonali", march-april 1956, pp. 880-882; M. Salvadori, "Ingegneria versus architettura", june 1956, pp. 139-140; "Alluminio prefabbricato e gusci di cemento armato per le case. Architetti Arthur A. Carrara e John Johansen", october 1956, pp. 454-455; M. Salvadori, "Volte di traslazione", agosto 1956, pp. 299-302; "Un foglio di cemento armato piegato su tre punte. Architetti Antonin Raymond e L. L. Rado", november 1956, pp. 535-536; R. Arienti, "Proposta per una copertura 'a pieghe' di una chiesa. Architetto Enzo Frateili", august 1957, pp. 279-280; "L'Auditorium Municipale di Shizuoka in Giappone. Architetti Kenzo Tange, Kanichi Kotsuki, Yoshikatsu Tsuboi", august 1958, pp. 279-280; "L'ossatura della Torre Velasca. Progetto architetti Ludovico Barbiano di Belgiojoso, Enrico Peressutti, Ernesto N. Rogers, strutture prof. Arturo Danusso", february 1959, pp. 713-714; "L'Hockey Rink della Yale University a New Haven. Architetto Eero Saarinen e Associati", march 1959, pp. 785-787; V. Gigliotti, "Innovazioni nei ponti dell'autostrada Pompei-Salerno", april 1959, pp. 855-860.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 11)

P.L. Nervi, M. Piacentini
Palazzo dello Sport, Roma, 1958-60



and "structurism," "in quanto la mancanza di una vera e propria funzione statica avrebbe sempre e in ogni caso riportato tale eventuale modellazione ad un fatto puramente formale."

Nervi clarifies this idea, using the example of the pillars of Palazzo dello Sport in Rome, (F. 11) conceived not as a modern interpretation of the columns, but as "elementi essenziali di un complesso organico, nato come una unità strutturale e di cui l'insieme e i particolari rispondono strettamente ad una precisa finalità statica." Few months after the editorial article signed by Nervi and Rogers, Felix Candela sends a letter to *Casabella* that is published in the October issue of 1959. The letter gives the editor the chance to talk again about the issue, criticizing the architects who rely on the Spanish engineer's skills and cannot manage to take advantage of the instruments which he offers to their invention. In the letter, Candela, according to Rogers, "lascia intendere la superficialità con la quale gli architetti cadono nello strutturalismo perché si accostano, il più delle volte, alla tecnica, facendosene dominare invece di impiegarla culturalmente per raggiungere risultati espressivi."[41]

In other words, following what Nervi had assumed,[42] the Spanish engineer, in his letter underlines how much the question of pseudo-structural exhibitionism has become progressively more substantial. Defending himself against the responsibility of this inclination and pointing the finger at some American companies guilty of advertising the production of all the "structural nuts," Candela expresses his opinion on the importance of choosing the type of structure and form, and the crucial rules of calculations and "calculating" engineers. It is necessary to have intuition and static awareness, qualities, in his opinion, not always acknowledged by contemporary architects: "Io spreco gran parte del mio tempo per far capire che le strutture che mi vengono proposte non sono realizzabili o che comunque io non sono in grado di costruirle così come mi vengono proposte."[43]

[41] E.N. Rogers, F. Candela, "Strutture e strutturalismo...", cit., p. 48.

[42] P.L. Nervi, "Architettura e strutturalismo...", cit., p. 5.

[43] E.N. Rogers, F. Candela, "Strutture e strutturalismo...", cit., p. 48.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Claiming with pride his intermediate position between architecture and engineering, Candela focuses on the principles and rules of all the structures, in tune with the most basic laws of static balance. Simplifying as much as possible the problems and finding "soluzioni sostanzialmente sensate" become a lasting imperative. He is sure that the success is not in building extravagant forms, but in studying the details with "sensitivity" and "common sense." By designing beams and pillars Candela is interested in functional reasons and in the arrangement of stiffening ribs. Like Nervi, he believes that it exists, without leaving solutions statically satisfactory, a wide margin "entro il quale esprimere la propria personalità e ottenere strutture espressive in armonia con la funzione."

As engineering contractor, he presents a series of works with photographs and drawings on *Casabella* which illustrate how to build "senza alcuna pretesa estetica o architettonica," as he writes, umbrellas of reinforced concrete formed by hyperbolic paraboloids. Actually far from representing only the resolutions of mere technical problems, his works demonstrates the ability to model the hyperbolic paraboloids plastically, in order to obtain original large-scale roofs. Double curved surfaces, a prerequisite key as a foil can work as a self-supporting structure, the hyperbolic paraboloids, having two systems of generating lines, facilitate, according to Candela, the placement of the reinforcement and, besides, consent to calculate the efforts in a relatively simple way for any form and for any placement of supports.

All Candela's structures give evidence of a technical skill to deal with difficult static problems in which the link between form and structure is indissoluble. He takes the form and the structure in a state of osmosis that, as Francesco Dal Co will write, regarding Santiago Calatrava, successor of Torroja and Candela, "l'eloquenza delle sue costruzioni risulta spesso fraintesa per eccesso di chiarezza."[44] Among many works in which Candela makes calculations,[45] the entranceway sculpture of a residential area at the Lake Tequesquitengo in Morelos (1957) and the ornamental fountain in the Plaza de los Abanicos in Lomas de Cuernavaca (1957-58), both of Guillermo Rosell and Manuel Larrosa, were skilfully planned structures in which the form resistance is linked to a free and natural organic expression and confirm the Spanish engineer thesis according to which the modern – as in the past – can mainly start from the analysis of the structure.

The Claimed Formalism

Six year after having sent the letter to Rogers, always on the pages of *Casabella*, Candela writes an article about the same subject, explaining the proper functioning of the hyperbolic paraboloid,[46] and the following year, writes, this time without justification , to emphasize the revolutionary character of producing free-form "dalla servitù degli elementi secondari o decorativi della composizione tradizionale, ma anche da quella degli elementi primari o strutturali."[47] From the writing comes a clear analysis of what had occurred in the past in relation to the field of formal experiments using reinforced concrete: concentrating on the recent phenomenon of the original structures designed with obvious exhibitionism, Candela calls "negative structuralism" that based on a simulated inversion of eternal structural principles with the consequence of "stabilire una confusione tra ciò che è semplicemente possibile e ciò che sarebbe desiderabile."

Certainly what is possible and what is desirable is a route to follow constantly, for Candela, because, respecting only the economy, the efficiency and simplicity of construction – conditions for the success of a work – the risk is the "repeatability" at the expense of originality. No structuralist architect, worthy of respect – he says – would accept on principle, to use a structure that has been previously conceived by another person. Consequently, Candela says that the most important condition of a structure is that it has to be "assolutamente originale," although this "originality" is always ephemeral. Avoiding that the art of construction comes to an end and is

[44] F. dal Co, "Le origini della morfologia resistente come meraviglia", in *Casabella*, 686, february 2001, p. 36.

[45] C. Faber, "Candela: The Shell Builder", Reinhold, New York, 1963, and M.E. Moreyra Garlock, D.P. Billington, op. cit., pp. 184-189.

[46] F. Candela, "Comprendere il parabolide iperbolico", in *Casabella*, 298, october 1965, pp. 56-63.

[47] F. Candela, "Architettura e strutturalismo", in *Casabella*, 306, june 1966, p. 24.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

paralyzed, he defined the role of the engineer and structuralist architect, which in his opinion, should dedicate their efforts to search for new resistant forms: "mi riferisco a un tipo di ricerca qualitativa e formalista, in opposizione a quella quantitativa e misurabile."[48]

Repeating the inadequacy of the theoretical work on its own and being in favour of the progressive realizations with trials on natural scale, Candela concludes with reminding readers how much should join form-resistant structural types, from the consuming economy of materials to the simplicity of construction, employing simple calculations performed not only by an exclusive minority of specialists, until their flexibility which permits the possibility of adaptable combinations to different plant positions. He writes: "Nel mio caso particolare, la mia maggiore soddisfazione non consiste nell'aver eseguito certe strutture spettacolari – sebbene confessi di aver avuto gran soddisfazione nel farle – ma nell'avere contribuito, anche in misura minima, ad alleggerire l'ingente problema di coprire economicamente spazi abitabili, dimostrando che la costruzione di gusci non costituisce un'impresa straordinaria che dà immortalità ai suoi autori, ma un procedimento costruttivo semplice e flessibile. L'umile parapioggia è il mio più grande orgoglio, e soprattutto vedere che viene utilizzato con successo da molte persone in diverse parti del mondo. Nessuno lo considera ormai un'ostentazione strutturale, ma un elemento utile e economico; è diventato un luogo comune e può essere utilizzato dall'architetto per il compito specifico di ottenere con mezzi semplici la bellezza."[49]

[48] F. Candela, "Architettura e strutturalismo...", cit., p. 29.

[49] Ibidem.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Félix Candela

Antonio Lamela

Dr. Arquitecto
Fundador y director del Estudio LAMELA
Académico RAE y RAM
Premio Jaime I en Arquitectura, Paisaje y Sostenibilidad 2006
Doctor Honoris Causa por la Universidad Camilo José Cela de Madrid
Propulsor del Egoísmo y el Cosmoísmo
Socio Fundador del Capítulo Español del Club de Roma, Club español de la Energía, Club de Medioambiente

Recibo el encargo de este quehacer con interés, para trasladar al papel mis recuerdos sobre Félix Candela y por forzarme a refrescar mi memoria referente a algo que me llegó a interesar mucho, hace años, obligándome a reflexionar con consecuencias posteriores muy influyentes en mi ejercicio profesional.

Deseo tratar de aquello que sospecho que otros no van a referir, y evitar lo que supongo que van a contar. Lo que no deja de ser una especulación peligrosa por mi parte; pero, acepto mi propio reto.

Mi relato obvia connotaciones políticas, manejadas en demasiadas ocasiones, como el propio Félix Candela lamentaba, pues estaba en la misma línea de su amigo y compañero Fernando García Mercadal y otras personas inteligentes, quienes habían decidido pasar página; lo contrario no conducía a nada. Fue una época en la que muchos, desde la infancia, vivimos muy tristes y duros momentos, ya superados a pesar de las profundas marcas dejadas por demasiadas heridas. Es infantil y desafortunado caer ahora, de nuevo, en tales trampas. Félix Candela merece tal respeto, personal y profesionalmente, que no es admisible utilizarle políticamente, ni siquiera de refilón. Él tampoco lo aceptaba.

El enfoque de mis líneas es mayoritariamente humano, menos profesional, como mero recuerdo de encuentros de dos colegas separados por 16 años de edad, que implican años muy complejos de la vida de España. A esto hay que añadir que, mientras que yo era estudiante, Félix Candela ya era una personalidad muy conocida por la peculiaridad de algunas de sus creaciones que, en ocasiones, se tomaban como referenciales en nuestra Escuela de Arquitectura y revistas profesionales, a pesar de las dificultades de la comunicación informativa de aquella época, que, además, carecía de los medios y técnicas de hoy que nos permiten el contacto inmediato.

A Félix Candela le traté ocasionalmente. Mi recuerdo es, por tanto, muy corto y afectado por el paso del tiempo transcurrido. Hablo de memoria y meros recuerdos, quizás no suficientemente exactos para tomarlos como indiscutibles. El paso de los años se hace notar.

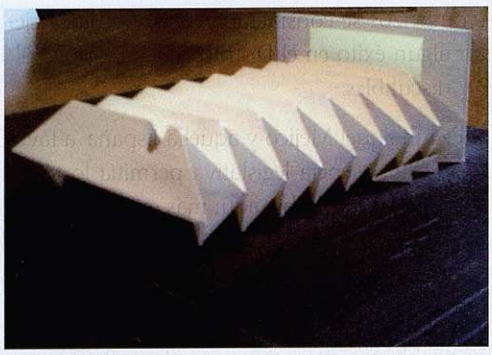
Mi interés por el hormigón

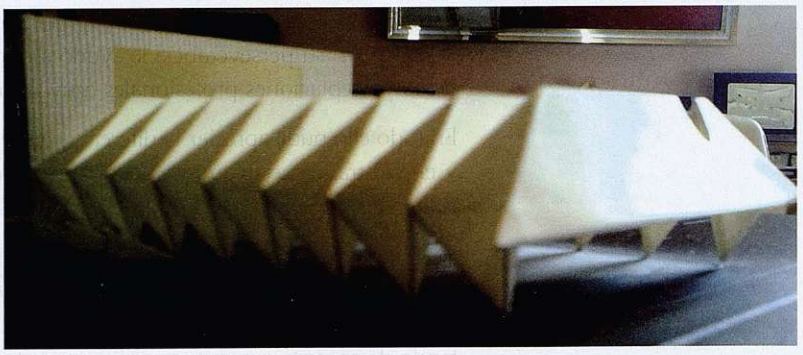
Debido a mi afición a un material de construcción tan extraordinario como es el hormigón –en sus distintas versiones y etapas a lo largo de la historia–, fui uno de los componentes del grupo español que introdujo en España los "hormigones preamasados en central" para suministrar a obras, evitando su elaboración *in situ*, único procedimiento utilizado hasta entonces, tan poco fiable.

Desde un principio, tuve predilección por su utilización. En mis primeras obras, fueron novedosas las losas de espesor variable, de 18 a 12 cm, que proyecté para las terrazas –3,20 m de voladizo– en el edificio de viviendas de O'Donnell 33, donde tuve que vigilar muy personalmente su armado, colocación y vertido del hormigón, por el riesgo que suponía. El problema de los encofrados de la época para conseguir superficies vistas en la cara inferior era muy delicado y costoso, ya superado con los nuevos sistemas y técnicas.

Hago esta referencia para justificar mi interés por el conocimiento de las estructuras laminares de otros colegas que prodigaron con acierto el empleo del hormigón. Y Candela fue uno de ellos; interesándome mucho sus creaciones, como manifestación evidente de la mejor cualidad del

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 1)
Maqueta de Iglesia,
Antonio Lamela

hormigón: su plasticidad, con diversidad de usos y funciones, cuando se sabe resaltar y aprovechar, cualquiera que sea su acabado, con posibilidad de resultados inimaginables, tanto en formas como en dimensiones. Con el hormigón casi todo es posible.

Nuestro encuentro en Méjico

Conocí personalmente a Félix Candela en Méjico, a principio de los años 60. No fue fácil organizar nuestro primer encuentro, pues era difícil localizarle, ya que viajaba mucho entre Méjico, EEUU y Europa, aunque venía aquí con menor frecuencia.

Me recibió muy cordialmente en su estudio mexicano. Llevaba una carta de presentación de su condiscípulo, y amigo de ambos, Fernando García Mercadal, con quien colaboré durante algún tiempo en Madrid, cuando era todavía estudiante. Su sobrino Alfonso García Noreña y yo éramos muy amigos, y estuvimos asociados durante un año, al pertenecer a distintas promociones –103ª y 104ª–, cuando yo aún no podía firmar proyectos pero tenía encargos. En aquella época, ambos colaborábamos en el desarrollo de proyectos de Fernando García Mercadal, a cambio de recibir sus magníficas enseñanzas. En alguna oportunidad nos habló de Félix Candela y de sus similares andanzas personales, tanto humanas como profesionales. En según qué ocasiones, yo sacaba a relucir las creaciones de Félix, que tanto me interesaron desde mi época de estudiante, y que me indujeron a emplear soluciones estructurales laminares en algún proyecto.

El deseo y motivo de contactar en persona con Félix Candela en Méjico fue, principalmente, para asesorarme por un especialista sobre algunos importantes problemas "reales" que se me planteaban en una iglesia parroquial, un centro comercial y otro de ocio, dentro del megaproyecto de una ciudad satélite de Madrid, "La Presilla", que luego no se llegó a realizar. La arquitectura laminar me incitó a una solución de iglesia (F. 1) que aún tengo la esperanza de realizar, aunque ahora la prefiera con otros materiales diferentes al hormigón que fue el que elegí originariamente, a pesar de sus dificultades de ejecución y alto coste. Su problemática de realización en obra –espesores, armaduras, recubrimientos, etc.–, respetando la normativa española de la época, ya lo hacía económicamente muy difícil, aunque muy interesante como trabajo de investigación. Todo ello se agudiza más en estos tiempos, con nuestro Código Técnico de la Edificación.

Las dudas sobre la ejecución de soluciones en hormigón armado que le planteé a Candela fueron varias. ¿Qué espesor mínimo se podía considerar como justificante para poder calificar a una superficie estructural de laminar, cuando se trataba de luces normales? ¿Cómo cumplir, en reducidos espesores, las normas españolas del momento para el hormigón armado en lo referente a sus exigencias técnicas: separaciones de armaduras, colocación de estribos, recubrimientos, etc.? ¿Cómo resolver las demandas añadidas de aislamientos térmicos, acústicos, impermeabilizaciones, más conservación, mantenimiento, limpieza…? ¿Tipos de hormigones a emplear, su plasticidad, la relación agua/cemento, los tipos de áridos, sus dosificaciones…? ¿Vertidos del hormigón en las piezas, vibrados y compactaciones de hormigones…? Y así sucesivamente, con un largo etcétera al que enfrentarse, seria y honradamente, para no caer en la irresponsabilidad o frivolidad.

El encuentro fue muy clarificador ya que Candela se había enfrentado a esas situaciones, llegando a aceptar soluciones no muy ortodoxas. Me confesó que había tenido problemas en los paraguas invertidos –que yo suelo llamar "candelas"– construidos en un principio con parabo-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

loides, fragmentados en cuadrados, y que en los comienzos se consideraban de muy difícil ejecución. Pero su perseverancia le ayudó a conseguir algún éxito en el Distrito Federal, con resultados y aceptaciones profesionales muy dispares y discutibles.

En todo ello pude apreciar la diferencia entre lo que eran aquel Méjico y aquella España, a favor y en contra, respectivamente. Mientras que en Méjico la ausencia legislativa permitía lo técnicamente no recomendable, en España no era posible, porque ya había aquí más exigencias normativas y técnicas.

Félix Candela era muy creativo e imaginativo, al juzgar por cuanto pude ver en su estudio y por cuanto pudimos hablar, especialmente cuando entramos en el tema que allí me llevaba, tratando de encontrar con su consejo respuestas a los problemas que a mí se me planteaban cuando seriamente quería proyectar y construir conchas, membranas o estructuras laminares para mis proyectos del Barrio de San Ignacio de Loyola, la "Ciudad Horizonte" o "La Presilla", en Madrid, entre otros varios.

Percibí en él un alto grado de intuición y empirismo, apoyado en maquetas auxiliares, más o menos artesanales –y de muy diferentes condiciones y tamaños–, que utilizaba como medio de trabajo y resolución proyectiva, al margen de cálculos rigurosos y la aplicación de normas de colocación y empleo más exigentes. Incluso hablamos de aplicar resoluciones matemáticas, llegando a hablar del empleo de mi sistema de integraciones de ecuaciones diferenciales con exponente fraccionario, que se creía que no eran integrables, pero que yo llegué a descubrir que sí lo eran.

Sus cálculos estructurales, aparentemente, eran más bien "a sentimiento" por roturas de maquetas previas, que él realizaba de muy distinta forma, según la dimensión de que se tratara, con decisiones muy empíricas al determinar armaduras, calibres, colocaciones, etc. No obstante, todo ello sustentado sobre su formación e información técnica, contrastadas con una práctica muy extensa, que le proporcionaba una visión muy personal de lo que podía ser o no ser, lo que utilizaba como filtro puntual de sus imaginativas ideas creativas, en cada caso, incluso con algunas sorpresas inesperadas y no deseadas, que no conviene olvidar.

Siempre le interesaban las formas estructurales atrevidas, como la gran cubierta del graderío del Hipódromo de la Zarzuela de Madrid, proyecto y obra de Eduardo Torroja, a quien admiraba, como técnico.

Aquel encuentro supuso un gran aprendizaje para mí, y aumentaron mis serias dudas sobre la racional utilización de algún tipo de soluciones y estructuras espectaculares, y según qué grados. Recordé mis rigurosos aprendizajes escolásticos de García de Arangoá, Rafael Fernández Huidobro, Luis Moya, José Antonio Domínguez Salazar y tantos otros. También aquella frase aprendida en nuestra Escuela: "los edificios tienden a no caerse", y la advertencia de mi padre sobre las maneras de arruinarse: "la más segura, con los técnicos".

Yo escuchaba prudentemente, sin atreverme a discutir aquello que no compartía o no entendía, pues, para mí, Félix Candela seguía siendo todavía un mito estudiantil, cuando aún yo no tenía criterios propios suficientes. Aquel recuerdo seguía estando vivo en mi memoria, aunque debilitándose a medida que profundizábamos en la temática que nos ocupaba.

A veces me daba la impresión, ante alguna pregunta mía, que "ni subía ni bajaba la escalera", simplemente permanecía en el descansillo, quizás debido a su ascendencia gallega, de la que yo también disfruto. Su segundo apellido, Outeiriño, diminutivo gallego de Outeiro, significa "pequeño lugar desde el que se otea el horizonte".

Aprovechando aquella oportunidad, me hizo muchas preguntas sobre Fernando García Mercadal y otros muchos colegas españoles contemporáneos que ambos conocíamos; también sobre la arquitectura española del momento. Nunca me hizo ninguna pregunta que rozara la política, lo que yo respeté al conocer algo de su historia en lo referente a este aspecto.

También se interesó, muy especialmente, por "don" Eduardo Torroja y el Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento, por la revista *Cortijos y Rascacielos*, que él recibía con frecuencia, así como la *Revista Nacional de Arquitectura*. Hablamos de Carlos de Miguel y de quienes conformaban su conocido "corralito", donde no era fácil entrar para aparecer en "su" revista. En según qué momentos, nos escuchábamos mutuamente con atención pero en una atmósfera poco con-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 2)

Torres Colón en construcción, Antonio Lamela

fianzuda, como era lógico, por la ausencia de amistad. Yo me mostraba respetuoso hacia él, y él cauteloso conmigo por no saber como pensaba humana y profesionalmente, a pesar de conocer mi buena amistad con Fernando García Mercadal, Luis Blanco Soler, Luis Gutiérrez Soto, Manolo Muñoz Monasterio, Miguel Fisac, Javier Lahuerta, Rodolfo García-Pablos, entre muchos otros que salieron a relucir.

En algún pasaje de cuanto relato fue testigo excepcional mi gran amigo, colaborador circunstancial en cálculo de estructuras y compañero de promoción –la 104ª–, el "gran Fernando" Cassinello Pérez, que también tuvo contactos frecuentes con Candela, lo que provocó un gran afecto y respeto mutuo, estando por medio el Instituto Torroja de la Construcción y del Cemento, la gran creación y legado de "don Eduardo", que tanto Félix como Fernando supieron valorar y admirar.

Pude comprobar, en algún momento, dentro de nuestra charla y comentando escritos suyos en alemán, que Félix lo hablaba con bastante fluidez. Yo todavía recordaba bastante de mi alemán –que luego, con el tiempo, he perdido del todo–, aunque no tanto como el francés, los dos idiomas que elegí en mi corto bachillerato de la posguerra e ingreso en la Escuela.

Por cierto, de aquel primer encuentro guardo una anécdota. Al percatarse de que yo escribía Méjico con "j", me dijo: "Lamela, mientras usted esté aquí le aconsejo que utilice la 'x' en vez de la 'j', pues no les gusta esta letra, aunque ellos la pronuncian como tal, pues nunca le dan sonido de 'x'. Esto se queda para algunos extranjeros". Comentamos el origen del entuerto que, en cierto modo, él también conocía, y que yo despejé –mucho tiempo después– en mi libro *Del idioma español y su futuro*, publicado por Espasa Calpe.

Encuentro en Madrid

Años más tarde, en 1973, tuvimos oportunidad de reencontrarnos en Madrid. Este segundo encuentro fue a sugerencia suya, para visitar Torres Colón, ya que le interesó el proyecto y quería conocer de primera mano las distintas versiones que le habían contado. Todavía estábamos en la primera versión del proyecto y el contacto se estableció a través de la constructora Huarte.

La solución, motivación e historia de Torres Colón (F. 2) le interesó muchísimo, así como la colaboración con Carlos Fernández Casado y Javier Manterola, que fueron quienes calcularon la versión estructural del proyecto, en su última etapa, cuando se pasó a la solución de arquitectura suspendida, comprimida contra la cabeza, trabajando las péndolas de hormigón a compresión, mediante el sistema de cables poscomprimidos cada dos plantas.

Él recordaba la visita que yo le había hecho en Méjico, nuestras conversaciones y mis inquietudes por las estructuras laminares. Incluso me preguntó si fui capaz de realizar mis proyectos, especialmente el de la iglesia de la que más le había hablado, y sobre la cual estuvimos discutiendo con motivo de su estructura laminar.

Después de nuestra visita a Torres Colón nos dirigimos al Instituto Eduardo Torroja, y allí mantuvimos una larga conversación sobre sus "candelas", ya que también podían suponer, según mi punto de vista, superficies de asiento de arquitecturas suspendidas, que es la obsesión permanente de mi concepto de la arquitectura. Las "candelas" permiten una modulación repetitiva que, según las dimensiones que se manejen, pueden suponer grandes superficies cubiertas con costes muy asumibles, y apoyos estructurales para construcciones más elevadas asentadas en ellas.

Félix era una persona aparentemente sencilla, alejada de egolatrías. Daba la impresión de que confiaba y creía en su propio trabajo, investigación y estudio. Disfrutaba con sus quehaceres y le ilusionaba su futuro innovador. Cuando la Fundación Antonio Camuñas le otorgó un premio por su vida dedicada a la Arquitectura y su aportación de las estructuras laminares, en una entrevista expresó: "No he inventado nada; he copiado de todo el mundo. Sí conseguí popularizar el uso de esas estructuras. En realidad he sido un contratista".

Por otro lado, tanto en Méjico como en Madrid, me pareció un hombre bastante invadido por una tristeza difícilmente entendible en una persona que había llegado a altas cotas profesionales. Algo había sucedido en su vida que le había marcado excesivamente. ¿Ha influido en ello el gran número de detractores públicos que tuvo? ¿Se sentía inseguro ante desconocidos que podían albergar juicios críticos adversos? Jamás me atreví a utilizar algún pretexto que condu-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

jera a despejar tal enigma. En otros momentos, tuvimos algunos encuentros muy casuales y superficiales en Madrid, sin significancia alguna.

Todos los contactos que he tenido a lo largo de mi vida profesional con distintos colegas de diferentes nacionalidades, especialmente los muy conocidos, siempre han dejado huella en mí, y han contribuido a mi enriquecimiento personal de muy distintas formas. Con alguno de ellos he podido encontrarme más de una vez, pudiendo apreciar importantes cambios en sus actitudes y pareceres. Lo que demuestra que todos evolucionamos.

Arquitecto o Ingeniero

De Félix Candela se ha escrito mucho y contradictoriamente, por lo que hay que interpretar todo con mucha cautela, empezando por mi propio relato. El hecho de que algo esté escrito no es aval suficiente, y mucho menos en los medios de comunicación. "Lo ha dicho televisión...", "lo he leído en..." son unas sentencias perversas que no se deben aceptar tal cual. La Biblia es aparte.

Candela estudió Arquitectura en nuestra misma Escuela, casi recién inaugurada, en la nueva Gran Ciudad Universitaria de Madrid, donde tuvo la oportunidad de ser alumno del acreditado Luis Vegas, gran especialista de cálculo de estructuras y de quien tanto nos hablaba Antonio García de Arangoá, mi profesor de estructuras –no siempre bien acogido por el alumnado, debido a su rigor y exigencia–, y que yo, sin embargo, tanto agradezco, por el gran y preciso aprendizaje que condicionó en mi formación profesional, ayudado por auxiliares a quienes también rindo reconocimiento a través de estas líneas.

Según tengo entendido, Félix tardó en tener su propio estudio, de modo individual y personal. En ocasiones, lo compartió con otros, como asociado, o simplemente actuaba como consultor especializado en según qué tipos de estructuras, o como calculista, a pesar de que algunos profesionales no le califican como muy ortodoxo y riguroso en la materia.

Por todo eso, quizás, la continuidad en sus auténticas creaciones y también en las adjudicadas, resulta difícil un seguimiento armónico coherente, al intervenir, a veces, otras personas con fuerte personalidad en muy distintos aspectos.

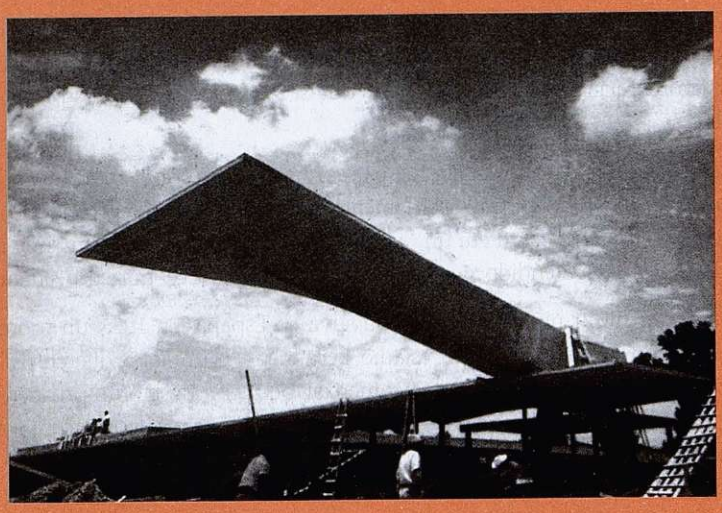
A Félix Candela le obsesionaba armonizar y lograr, a la vez, belleza y economía, a través de formas fácilmente calculables desde sus planteamientos estructurales, y, por supuesto, que fueran fácilmente entendibles para su realización constructiva. Tenía muy presente el concepto de economía para lograr la mejor posibilidad de construcción con los sistemas y técnicas de la época, sin olvidar la mano de obra que podía utilizar, que fue un gran obstáculo que tuvo que superar al tratarse de la del Méjico de aquella época. Podemos decir que su objetivo era conseguir la máxima funcionalidad estructural con el menor material posible.

La creación más sencilla de sus obras fueron los llamados *hypars* (F. 3) –con cantos rectos, o no, con picos agudos o con curvas–, y especialmente cuando recurre a la planta cuadrada o rectangular, con los cuatro característicos faldones unidos en el centro, donde se encuentra el tronco hueco que también hace de bajante pluvial. Con esta solución visité una gran nave de una industria manufacturera, en las proximidades del D.F. Otros modelos derivaron en formas de planta triangular o poligonal, incluso convirtiéndose en formas asimétricas o más caprichosas con muy diferentes inclinaciones. Cuando las alturas eran distintas, los interespacios servían de lucernarios que resolvían la iluminación natural, mayoritariamente cenital. Sus usos fueron muy diversos, sorprendentemente.

Sus construcciones también se utilizaron como elementos auxiliares para formalizar accesos importantes a las edificaciones que lo requerían, fueran suyas o no, posibilitando las soluciones de grandes voladizos de entrada que facilitaban las llegadas de grandes autobuses o de numerosos vehículos, simultáneamente.

Otras de sus conocidas aportaciones es la construcción de los paraboloides hiperbólicos, algunos de ellos de gran belleza, singularidad y espectacularidad, especialmente aquellos de grandes dimensiones, y más especialmente cuando usa el truco de manejar espesores aparentes desde fuera, con bordes más finos, para resaltar la idea de membrana o de arquitectura laminar, ya fuera plana, o no, como ocurre en el caso de sus famosas "conchas" que recuerdan a las de la fauna marina.

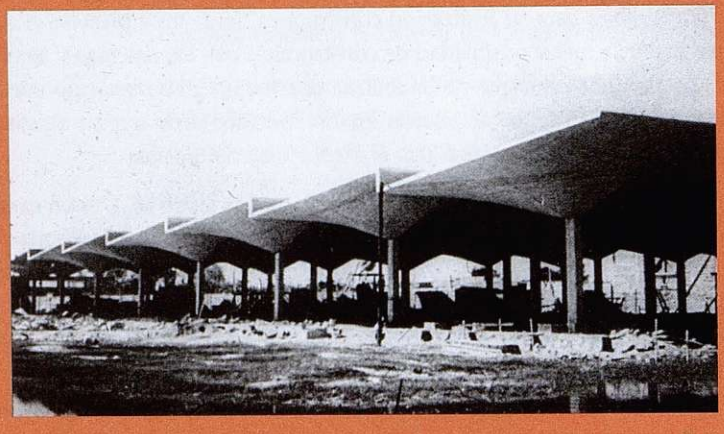
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 3)



(F. 4)



(F. 5)

(F. 3, 4, 5)
Paraguas de Félix Candela y Cubiertas Ala en Méjico

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

En mi opinión, las creaciones de Félix Candela se superan cuando crea los famosos cascarones parabólicos-hiperbólicos, de generatrices rectas, que cumplen su papel estructural de una forma bellísima, con eficacia y alto rendimiento, y que se han convertido en su marca arquitectónica reconocible.

La experiencia mexicana de Candela fue extraordinaria, extensa y reconocida incluso fuera de Méjico, aunque, adjudicada, mayoritariamente, a un "ingeniero civil mejicano", cuando ciertamente, por origen y formación era un "arquitecto español". Es una lástima que parte de su obra construida no se haya atendido y conservado como se merece, por su peculiaridad.

Félix no llegó a realizar ninguna obra típica suya en España. En 1973, un promotor inmobiliario le encargó un proyecto para un estadio Bernabéu, en un solar diferente al actual, que, en paralelo, querían transformar en centro comercial, pero el proyecto no prosperó. Sí tenemos las réplicas de sus conjuntos de *hypars* construidos en gasolineras de Méjico, y en las "candelas" metálicas españolas de Norman Foster para Repsol. Es algo que a mí me hace recordar el tópico papanatismo español ante lo extranjero. A propósito de ello... Un cronista de arquitectura, en su momento, llegó a publicar que Foster había retomado una tipología inventada por José Antonio Corrales y Ramón Vázquez Molezún, utilizada en el pabellón español de la Exposición Universal de Bruselas de 1958; y que también en la década de los 60 Félix Candela construía en Méjico sus famosos paraguas. Era la realidad invertida... Esta suposición no tiene fundamento, pues coincidí con mis amigos Corrales y Vázquez Molezún en la Escuela de Arquitectura en una época en que Félix Candela ya era conocido por sus singulares estructuras.

Sí es cierto que en muchas ocasiones, los creadores e innovadores de una idea feliz no son conscientes de la trascendencia de cuanto están aportando –ni están en condiciones de valorarlo–, que es lo que pueden o tienen que hacer quienes vivirán después, y obtener provecho de ello, si son capaces.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Félix Candela. Colaboración con TYPSA en los años ochenta

Pablo Bueno Sainz
Dr. Ingeniero
Presidente de TYPSA, España

Félix Candela vino a verme a mi despacho en la sede de TYPSA, situada entonces en la plaza del Liceo de Madrid, a principios de 1980. Estaba jubilado como catedrático de la Universidad de Illinois en Chicago, tenía 70 años y estaba en perfectas condiciones, físicas, intelectuales y sobre todo anímicas. Mantenía en aquel momento una relación profesional con el estudio saudí de arquitectura IDEA CENTER y buscaba en España una empresa consultora de arquitectura para trabajar en Arabia, colaborando con ese estudio. Juan Antonio Ridruejo le sugirió TYPSA como equipo idóneo para desarrollar ese trabajo y nos puso en contacto.

La colaboración que él pretendía con los arquitectos saudíes no se llevó a efecto porque en TYPSA estábamos en ese momento totalmente ocupados con el proyecto del Nuevo Campus de la Universidad Islámica de Riyadh, pero mantuvimos el contacto y, unos meses después, cuando Félix se desligó de su compromiso con los arquitectos saudíes –ya en 1981– se integró en TYPSA como colaborador especial, manteniendo una magnífica relación profesional y humana, durante casi 10 años, tanto conmigo como con todos los arquitectos e ingenieros de TYPSA con los que tuvo contacto.

Probablemente en su decisión de dejar la colaboración con los arquitectos saudíes, y ligarse a TYPSA como asesor, influyó su amor a Madrid. Se sentía madrileño, amaba el Madrid de los Austrias y, aunque tenía un magnífico apartamento en Manhattan frente a Central Park, prefería vivir en Madrid. Además se sentía español y vio en su colaboración con TYPSA la posibilidad de contribuir a crear un equipo español de profesionales de la arquitectura y la ingeniería que pudiera competir en el mercado internacional con las grandes empresas británicas y americanas.

Todos los que le conocimos guardamos un excelente recuerdo tanto de su valía profesional como de su gran calidad humana. Era un trabajador infatigable, disfrutaba trabajando y continuó haciéndolo hasta el final.

Tenía una gran inquietud profesional e intelectual. Nunca consideró que sabía bastante y nunca terminó de estudiar y aprender.

La revolución digital le sorprendió en edad avanzada y sin embargo no se resignó a quedar desfasado ni renunció a ponerse al día en las nuevas técnicas y métodos de trabajo.

Félix era un gran profesional y, a pesar de las dificultades de su circunstancia histórica y personal, había realizado una gran obra innovadora y disfrutaba de reconocimiento internacional. Cuando le comuniqué al Rector de la Universidad de Riyadh su incorporación al equipo de diseño del Nuevo Campus, pude presentarle sin ningún rubor como uno de los mejores arquitectos mundiales del momento. A pesar de ello era un hombre sencillo, nada engreído, muestra inequívoca de su gran inteligencia y cordura.

Su formación básica era la de un arquitecto, amplia y sólida, al modo tradicional, tal como se impartía en la Escuela de Madrid en el periodo anterior a la guerra civil. Sobre este fundamento, en el desarrollo de su praxis llegó a ser un profesional polifacético. No se podía distinguir con claridad si actuaba como arquitecto, o como ingeniero, o como constructor: era las tres cosas a la vez, y en grado eminente. Su actividad como constructor impregnó sus diseños de sentido práctico.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 1)

Félix Candela, en el centro de la imagen, con antiguos compañeros de TYPSA en el año 1987



Como arquitecto tenía una visión multidisciplinar. Era capaz de producir ideas de ordenación urbana, o de diseñar formas arquitectónicas singulares, o de proyectar y calcular soluciones estructurales. En éstas se centró quizás su atención principal, sobre todo en los años que colaboró en TYPSA.

Tenía firmes convicciones humanísticas y profesionales. Entre éstas, preferencias muy definidas sobre los métodos de abordar los problemas arquitectónicos y técnicos, y también sobre ciertas formas muy concretas de resolverlos. Sin embargo, estas claras preferencias no le impedían comprender y aceptar otros puntos de vista distintos, o incluso opuestos al suyo, en su colaboración con otros profesionales. Era capaz de adoptar una visión autocrítica de sus propios planteamientos.

Durante los años que colaboró con nosotros demostró una gran capacidad de relación humana y de integración en el ambiente donde se encontraba, y entabló buenas y duraderas amistades. Se mezclaba con la gente de todos los niveles, participaba siempre con buen humor en las comidas en el restaurante Miguel Ángel, cerca de la oficina, y en las partidas de mus que manteníamos los viernes después de comer.

Tenía gran paciencia y una resistencia física poco común en personas de edad avanzada. Soportaba bien los viajes. Hice dos veces con él el trayecto Madrid-México-Veracruz-Xalapa y retorno a Madrid, y no mostró ningún síntoma de cansancio. En cierta ocasión, trabajó durante un mes en equipo con profesionales mucho más jóvenes desplazados a Riyadh, bajo el duro clima del verano saudita y en condiciones nada cómodas de trabajo y alojamiento. Sin embargo se mantuvo activo, sin dar signos de cansancio, e incluso, en los ratos de ocio, participaba en incursiones al centro antiguo de la ciudad.

En aquella época, TYPSA estaba dedicada plenamente a un gran proyecto: el planeamiento urbano y el desarrollo completo de este proyecto y del diseño constructivo de la Universidad Islámica de Riyadh, que entonces se encontraba en sus fases iniciales y sometido a todas las dificultades e incertidumbres que suelen acompañar a este tipo de megaproyectos. Félix comprendió en seguida que aquella era una magnífica oportunidad de aportar su experiencia profesional para contribuir a un gran proyecto.

Su contribución al proyecto fue amplia y variada. Colaboró en el planteamiento de la revisión del Master Plan (hubo que revisarlo cuando ya estaba avanzando el proyecto porque la propiedad decidió cambiar el emplazamiento del campus), aportando ideas valiosas y, sobre todo, su visión crítica.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 2, 3)

Master Plan de la Universidad Islámica de Riyadh





Le ofrecimos incorporarse con el equipo de arquitectos que dirigía el diseño de los edificios: Antonio Vázquez de Castro, José Luis Iñiguez y Jesús Velasco, pero él prefirió integrarse en el departamento de Estructuras, dedicándose al diseño de la zona deportiva donde se le ofrecía la oportunidad de aplicar sus ideas plásticas y estructurales.

Recuerdan los ingenieros del departamento, Luis Catalán, Fernando Tejedor y Miguel Ángel Ezquerra, que, antes de comenzar a trabajar con él, les hizo entrega de una copia del número 57-16 del *Journal* del ACI titulado *General Formulas for Membrane Stress in Hyperbolic Paraboloidical Shells*, escrito por él en octubre de 1960, y aún conservan el manuscrito que sirvió para que les contara, de un modo sencillo y muy didáctico, cómo acometer y resolver los problemas de cálculo, una muestra más de la generosidad con la que compartía su saber.

Los paraboloides hiperbólicos constituidos por membranas delgadas de hormigón ligeramente armado habían sido sus formas predilectas y, ahora, volvían a cobrar protagonismo en sus diseños para la Universidad de Riyadh. Empezó con sus famosas "setas" monofuste sobre el que se

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

apoyan y despliegan cuatro sectores de paraboloide hiperbólico. Su coronación es horizontal y sus aristas comunes son rectas con una pendiente determinada. Sus dimensiones eran variables, simétricas o asimétricas. Ante las dudas sobre los espesores de la lámina, las dificultades de encofrado y las necesidades de refuerzo en los bordes superiores y aristas, él respondía: "Esto es muy fácil, hasta mi hermano, que es constructor, lo sabe hacer". De este modo diseñó las cubiertas de la Estación de Servicio, del Centro de los Boy Scouts y de las tribunas secundarias del Estadio, con voladizos entre los 10 y 15 m de longitud.

Pero su participación más importante en esta fase de diseño fue la concepción de la cubierta de la tribuna principal del Estadio como un gran sector de paraboloide hiperbólico limitado por dos planos inclinados que se intersectaban en una recta horizontal paralela al lado mayor del campo de juego. Ambos planos, en su intersección con el paraboloide hiperbólico, generaban sendos arcos de parábola, cuyos extremos coincidían en los dos puntos de apoyo del paraboloide hiperbólico. El arco de parábola interior del estadio volaba más allá del graderío, llegando a cubrir no solamente la tribuna, sino también buena parte del campo de juego, y además proporcionaba sombra a prácticamente todo el estadio a partir de media tarde. Este arco interior era muy rígido y pesado con lo que el paraboloide se mantenía tensionado en todas las circunstancias de viento, y conseguía su equilibrio sujetando el arco exterior del estadio con tensores verticales, integrados en la fachada del graderío principal.

La novedad más importante de este singular diseño es que, dadas las dimensiones (150 m entre apoyos y 60 m de altura) le llevó a diseñar la lámina en estructura metálica.

Decidió aprender el sistema de diseño gráfico por ordenador que acabábamos de implantar en TYPSA, el programa MEDUSA, con el fin de poder visualizar los problemas que los perfiles metálicos le imponían a su idea.

Los perfiles metálicos, a situar en las dos familias de directrices rectas, tenían que ir girando para conectarse entre sí. Pensó primero en tubos circulares. Éstos le imponían condiciones de corte y soldadura que lo hacían antieconómico. Luego pensó en tubos cuadrados para facilitar algo más el plano de soldadura. El problema aparecía al tener que torsionar el tubo para que presentara la misma sección resistente en cada punto de encuentro con la otra familia. Esta tarea también era difícil de ejecutar en taller y luego en obra. Finalmente optó por emplear perfiles UPN. Una familia tendría las alas hacia fuera de la superficie reglada, y la otra hacia dentro. También era necesario aplicarles una torsión, pero para un perfil abierto hay menores dificultades que para uno cerrado. La conexión en los nudos de las dos familias de generatrices se efectuaba soldando alma con alma. Los dos arcos frontales que limitan la superficie de la cubierta los concibió como vigas cajón, también en estructura metálica. Sus dimensiones eran de 2 m de canto y 1 m de ancho. Fue determinando los esfuerzos que recibían en su trasdós por la acción de las familias de perfiles. Ajustó las dimensiones de los perfiles por las acciones de tracción en su directriz, y los cortantes y momentos flectores locales por la influencia en los nudos de la otra familia.

Una vez que determinó que los esfuerzos secundarios en los elementos de la membrana eran despreciables, a peso propio o sobrecargas de uso, dio por terminado su predimensionamiento. "A partir de ahora podéis usar esos maravillosos programas de cálculo de la NASA para verificar todo lo que he diseñado". Y así lo hicimos, comprobando que su diseño estaba perfectamente ajustado desde el punto de vista estructural.

Se completaron los cálculos con el ensayo en túnel de viento en el INTA y se consideró el efecto de las tormentas de arena, propias del lugar, aplicando un factor de corrección a la densidad del aire y analizando las zonas de remanso que pudieran provocar depósitos de arena. Esto obligó a reforzar ligeramente algunas de las barras.

En el momento de la construcción el contratista presentó, y así se le aprobó, una alternativa que, manteniendo la forma, cambiaba los perfiles UPN por vigas trianguladas tubulares del sistema Mero, constituyendo una estructura de doble capa en la que los esfuerzos fundamentales seguían siendo los mismos de la estructura tipo membrana que él había calculado.

La estructura se construyó y constituye desde hace más de 25 años uno de los símbolos de la Universidad de Riyadh por su funcionalidad, pues cumple con el objetivo de dar sombra a todo el estadio a partir de media tarde, por su sencillez estructural, y por su gran belleza formal.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

SURFACE DEFINITION

Assume two straight nonparallel, nonintersecting lines, *HOD* and *ABC* (Fig. 1), in space, which will be provisionally named *directrix*. Straight lines h_n that intersect both directrix, being at the same time parallel to one plane xOz named *director plane*, define the surface. They will be called the *first system of generators*. The two directrix determine in their turn a second director plane yOz, parallel to them. The surface may also be considered as created by a *second system of generators* i_n parallel to this plane and intersecting every generator h_n of the first system.

The hypar contains, therefore, two systems of straight lines h_n and i_n, each system being parallel to a director plane and both planes forming an arbitrary angle ω. Every point of the surface is the intersection of two straight lines contained in the surface.

Taking as coordinate axes the two generators passing by the crown of the hypar and the hypar axis or intersection of both director planes, the equation of the surface, in these birectangular coordinates, will be:

$$z = kxy \quad \text{.....(1)}$$

k being a constant which represents the *unitary slope* or *warping* of the hypar [in Fig. 1, $k = AA'/(OB \cdot OH)$]; $xOy = \omega$ can be any angle; xOz and yOz are right angles.

This is the *simplest possible equation* of second degree tying together the three coordinates of each point. When the director planes form a

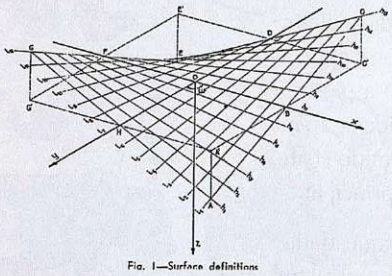


Fig. 1—Surface definitions

Felix Candela, architect, Mexico City, Mexico, is well known for his work in the field of concrete shell structures. Mr. Candela is the founder of Cubiertas ALA, S.A., which specializes in such structures. An ACI member since 1947, he is currently a member of Committee 334, Concrete Shell Structures.

right angle ($\omega = 90$ deg) the hypar is *equilateral* or *rectangular*. When ω is any other angle, the hypar is *oblique*. Plane sections parallel to the bisecting planes of the director dihedral angle xOy are parabolic. They are named *principal parabolas*, and are respectively curved upward (*GOC*) and downward (*AOE*); hence the surface is *anticlastic* or inversely doubly-curved. All other plane sections and their projections on plane xy are hyperbolas or their degeneration in two straight lines, except those parallel to the z axis which are parabolas and, of course, those parallel to the director planes which give the straight generators.

As a translation surface (Fig. 2), the hypar may be considered as generated by a principal parabola *ABC* that moves parallel to itself along an inverse principal parabola *BOF*. Therefore the surface has two systems of parabolic generators. Each system is composed of identical parabolas situated in parallel planes.

STRESS EQUATIONS IN BIRECTANGULAR AXES

Equations of membrane stresses* in a surface represented by $z = f(xy)$, in a system of coordinate axes in which angle xOy can have any value ω and xOz, yOz are right angles, are obtained[6] by expressing the equilibrium along x, y, and z of the forces acting on the surface element shown in Fig. 3, neglecting the differentials of second order. They are:

$$\frac{\delta s_x}{\delta x} + \frac{\delta \tau}{\delta y} = -X \sin \omega \quad \text{.....(2a)}$$

*It must be understood that stresses here are, strictly speaking, stresses times the shell thickness.

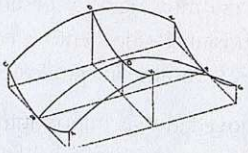
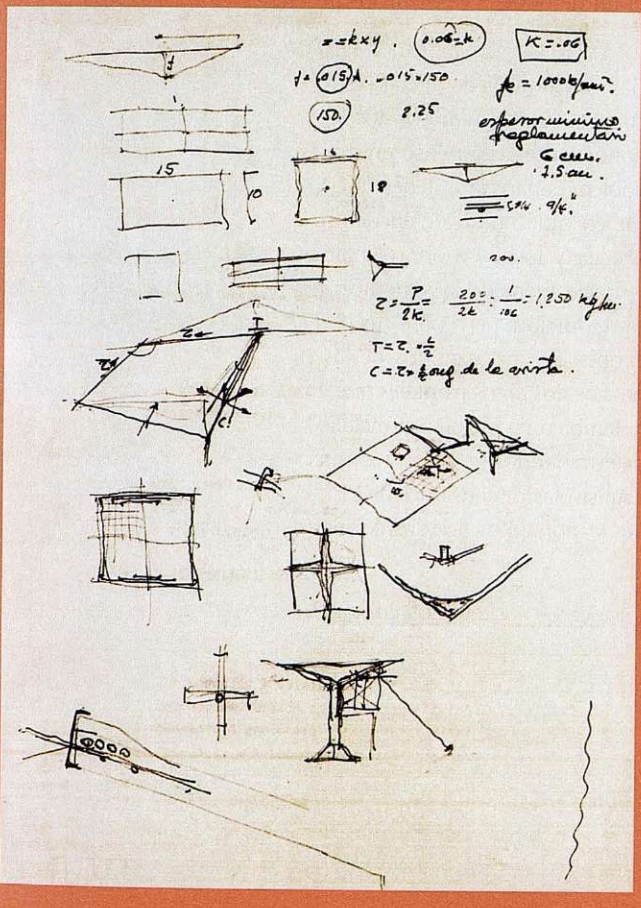


Fig. 2—The paraboloid surface has two systems of parabolic generatrix

(F. 4)



(F. 5)



(F. 6)



(F. 7)

(F. 4)

Artículo 57-16 del *Journal* del ACI, octubre 1960

(F. 5)

Bocetos originales de Félix Candela

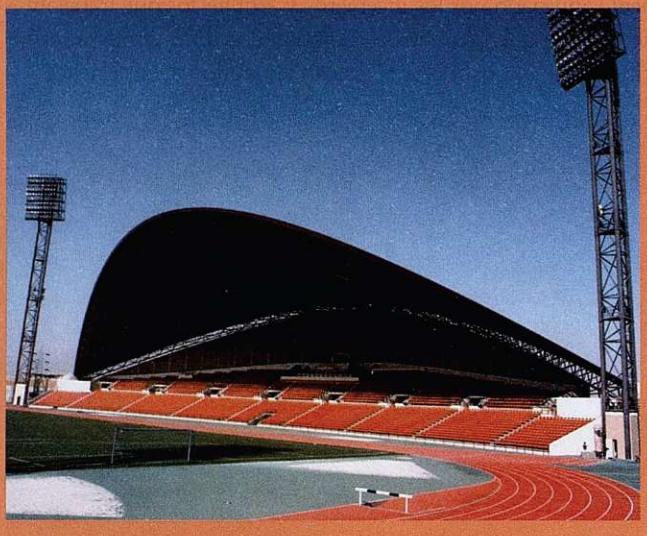
(F. 6, 7)

Cubiertas de la Estación de Servicio del Centro de los Boy Scouts en la Universidad Islámica de Riyadh

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 8)



(F. 9)



(F. 10)



(F. 11)

(F. 8, 9, 10)

Cubierta del Estadio de la Universidad Islámica de Riyadh en construcción y finalizada

(F. 11)

Artesonado de vigas para la estación de Metro de la Puerta del Sol, Madrid

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Posteriormente, Félix siguió colaborando con TYPSA, de forma diversa y con distintos grados de intensidad, en muchos otros proyectos. Entre ellos cabe destacar los anteproyectos para el Palacio Legislativo del Estado de Veracruz y para la Procuraduría del Estado en Xalapa (México), en colaboración con Fernando Higueras, así como en la cubierta del nuevo vestíbulo de la estación de Metro de la Puerta del Sol en Madrid.

Para la cubierta de este recinto planteó una losa de hormigón sobre un artesonado de vigas en tres direcciones. Esta idea no tuvo una gran acogida inicial, y Félix la defendió –con energía pero con una gran humildad– hasta conseguir que se aceptara. Había que predimensionar la solución antes de calcular la estructura, y para ello generó un programa específico idirectamente en la calculadora! En unas horas estaban predimensionadas las vigas y teníamos también la influencia sobre los pilares. Los cálculos definitivos permitieron comprobar la gran precisión de resultados de su programa "aproximado".

También durante esa etapa, Félix Candela puso en contacto con TYPSA a Santiago Calatrava, entonces una joven promesa que estaba iniciando su despegue, y en el que supo descubrir un brillante futuro que después se ha confirmado. De este contacto surgieron diversas oportunidades de colaboración.

Pero lo que le hizo ser especialmente apreciado por los ingenieros y arquitectos que trabajamos con él fue su llaneza y la paciencia con la que nos trataba como interlocutores y nos transmitía su experiencia de arquitecto, ingeniero y constructor, todo ello en grado de excelencia.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



3 FORMA ESTRUCTURAL, CÁLCULO Y CONSTRUCCIÓN

STRUCTURAL FORM, CALCULATION AND CONSTRUCTION

La intuición y el cálculo en Félix Candela, y algunos recuerdos
José Calavera Ruiz

La forma estructural en la obra de Félix Candela
Enrique González Valle

Félix Candela: ingeniería y arquitectura bajo un mismo paraguas
Florencio J. del Pozo Vindel

El formalismo de Félix Candela
José María Goicolea

Félix Candela y Eladio Dieste, dos maestros
Gonzalo Larrambebere

Apoyar
Javier Manterola

Félix Candela y el Paraboloide Hiperbólico: forma estructural y forma visual
José Antonio Torroja

Capilla de San Antonio de las Huertas
Tacaba, México D.F., 1956

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

La intuición y el cálculo en Félix Candela, y algunos recuerdos

José Calavera Ruiz

Presidente de honor de INTEMAC
Profesor Emérito de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid UPM, España
F. ACI, F. ASCE, F. IABSE

Conocí personalmente a Félix Candela a principios de los años 80. Antes habíamos cruzado algunas cartas y por supuesto conocía su importancia dentro del mundo del hormigón estructural y su especial importancia dentro de las estructuras laminares.

Félix Candela es un arquitecto que tiene una particularidad que rara vez se presenta. Es un hombre que tiene una obra inmensa, una parte importante de la cual ha proyectado, dirigido la construcción y construido, y que, al mismo tiempo, es un investigador y una figura indiscutible en el campo académico. Es decir, es un investigador y un profesor que ha ejercido intensamente la profesión.

Yo tardé en conocerlo personalmente porque cuando empecé a ir a México él ya estaba en Estados Unidos, y cuando tuve contactos con la Universidad de Illinois ya se había jubilado, es decir, que nuestro trato se desarrolló fundamentalmente en España.

Nos encontramos en tres o cuatro reuniones, tras las cuales yo solía llevarlo a su casa de Madrid, junto a la calle Mayor, donde había comprado la casa donde nació y la había rehabilitado.

Esta época era la de su colaboración brillante e intensa con TYPSA. Recuerdo muchas cosas muy particulares que me contaba. Por ejemplo, que a su hermano y a él, cuando se fueron a México, les tocó la lotería. Luego he puntualizado, con su nieta Julia, que les tocó dos veces. Según me contaba Félix, y parece raro en dos hermanos arquitectos, puestos a montar un negocio, la mejor idea que se les ocurrió fue montar una productora de cine, que acabó en la quiebra y por lo tanto con su dinero, en vista de lo cual, me decía Félix, tuvieron que ponerse a trabajar en la construcción.

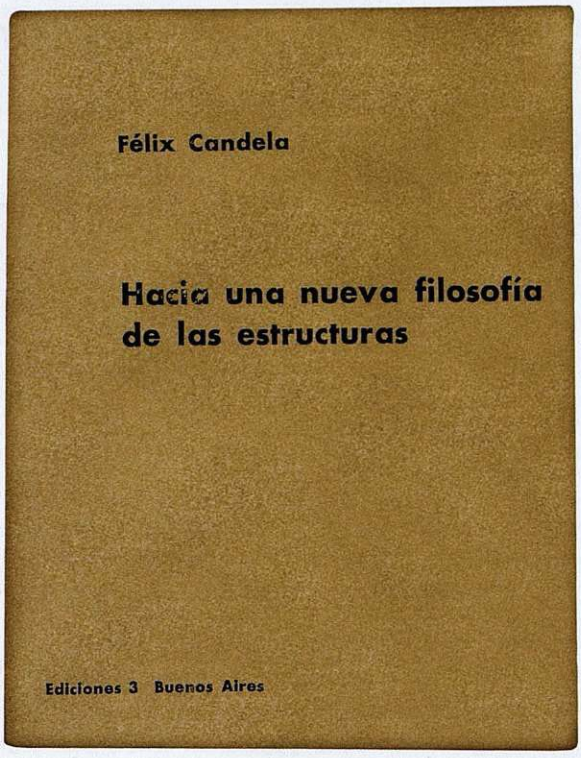
Otro recuerdo curioso que me contaba es que en una ocasión, en sus principios como arquitecto en México, que no fueron fáciles, le presentaron a un empresario muy importante que estaba pensando en construir una nueva fábrica. Al empresario le cayó muy bien Félix y le invitó a visitar sus oficinas. Y efectivamente subieron al coche, el empresario y Félix detrás y el chofer delante, pero la sorpresa de Félix es que el empresario –estamos hablando de México de los años 40 y 50– llevaba, cruzada en el suelo, delante del asiento posterior, una metralleta Thomson que, por si el lector no lo recuerda, era un tipo de metralleta larga que llevaba un cargador circular de un diámetro realmente enorme. Cuando llegaron a la fábrica ya el empresario había completado su opinión sobre la capacidad técnica de Félix Candela y al entrar en la barrera de control de la fábrica del edificio de las oficinas, dio instrucciones al personal para que le dijesen al Ingeniero, quien estaba ocupándose de los preliminares del proyecto, que prescindía de sus servicios porque había decidido encargarle el proyecto, como así fue, a Félix Candela.

La muerte de Félix Candela fue seguida de un silencio extraño en España. Evidentemente se mezcló una ignorancia, que solamente puede estimarse como parcial porque la figura de Félix era internacionalmente conocida, con consideraciones políticas.

Publiqué una nota titulada "En recuerdo de Félix Candela", en la *Revista de Obras Públicas* de junio de 1997, nota que después me pidió la Asociación Argentina de Ingeniería Estructural para reproducirla en su revista en agosto del año siguiente. La extraordinaria parquedad española en reconocer el valor de lo que habíamos perdido fue compensada, al menos, con dos hechos. En el número de la revista *The Economist* correspondiente al 3 de julio, se publicó un artículo cuyo título era "Ingeniería: se necesitan héroes" y en él se pasaba revista a la época heroica de la

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 1)
Portada del libro de Félix Candela



Ingeniería Civil con Stephenson, Brunel, etc., y se citaban, muy elogiosamente, a tres ingenieros europeos, Nervi, Torroja y Candela.

De Candela se ocupa el profesor David Billlington de la Universidad de Princeton. Billington tiene una doble faceta especialmente interesante. Por un lado, es autor de un famosísimo libro sobre estructuras laminares, de un rigor y una precisión insuperables, pero por otra parte, le ha interesado siempre lo que no me gusta que se llame filosofía de las estructuras, aunque sea un nombre muy común y que yo prefiero llamar bases conceptuales del proyecto estructural. En este sentido, entre otras muchas obras importantes, el profesor Billington ha publicado el libro de *The Tower and the Bridge*, desgraciadamente sin traducción española, donde se dedica a glosar muchas figuras importantes en el tema y, en particular, a Gaudí, Torroja y Félix Candela. De Félix Candela habla maravillosamente, pero sobre todo titula la parte correspondiente a él bajo el epígrafe "La disciplina de la delgadez".

Hay un aspecto de Félix Candela que es sistemáticamente presentado de una forma incierta, cuando no falsa, y es el de que Félix Candela sabía poco de cálculo estructural. Esta creencia quizá estaba provocada por el propio Félix con su particular sentido del humor y su humildad, pero se ha valorado mucho lo que había en él de intuición en detrimento de su capacidad técnica. Yo lo coloco entre los cinco grandes intuitivos que he conocido (Freyssinet, Torroja, Salvadori, Nervi y Candela), pero su extraordinaria intuición no era la única arma que él tenía para proyectar y construir. Sabía mucho más cálculo de lo que se supone y probablemente de lo que él decía. Simplemente cito a continuación algunos trabajos suyos de una importancia excepcional en relación con el cálculo del hormigón estructural.

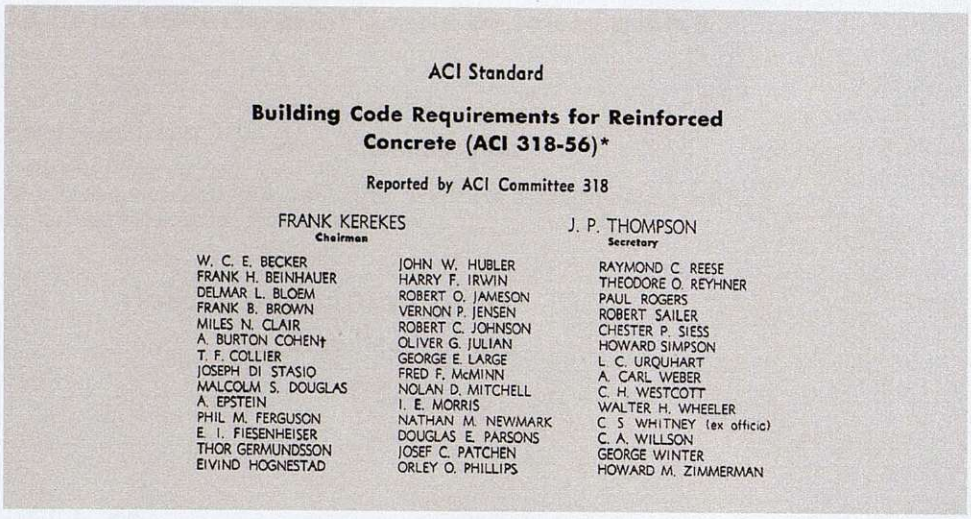
En 1951 publica en el *Journal* del ACI, el artículo "Simple Concrete Shells Structures". Hay que decir que Félix Candela, fue elegido Fellow del ACI, distinción que no es nada fácil que se otorgue y menos para alguien no norteamericano.

En segundo lugar, pidió permiso a Saliger sobre una traducción al español de su libro en alemán *Cálculo en rotura de estructuras de hormigón*.

Ambas referencias revelan un conocimiento muy especializado y, sobre todo, muy al día de cuál era la situación del cálculo estructural del hormigón. Pero sobre todo el libro *Hacia una nueva filosofía de las estructuras*, del que tengo un ejemplar publicado en Buenos Aires en 1962 (F. 1), pero

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 2)
ACI Standard



ACI Standard

Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-56)*

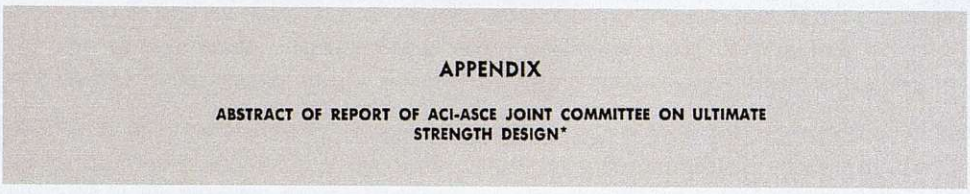
Reported by ACI Committee 318

FRANK KEREKES
Chairman

J. P. THOMPSON
Secretary

W. C. E. BECKER
FRANK H. BEINHAUER
DELMAR L. BLOEM
FRANK B. BROWN
MILES N. CLAIR
A. BURTON COHEN†
T. F. COLLIER
JOSEPH DI STASIO
MALCOLM S. DOUGLAS
A. EPSTEIN
PHIL M. FERGUSON
E. I. FIESENHEISER
THOR GERMUNDSSON
EIVIND HOGNESTAD
JOHN W. HUBLER
HARRY F. IRWIN
ROBERT O. JAMESON
VERNON P. JENSEN
ROBERT C. JOHNSON
OLIVER G. JULIAN
GEORGE E. LARGE
FRED F. McMINN
NOLAN D. MITCHELL
I. E. MORRIS
NATHAN M. NEWMARK
DOUGLAS E. PARSONS
JOSEF C. PATCHEN
ORLEY O. PHILLIPS
RAYMOND C. REESE
THEODORE O. REYHNER
PAUL ROGERS
ROBERT SAILER
CHESTER P. SIESS
HOWARD SIMPSON
L. C. URQUHART
A. CARL WEBER
C. H. WESTCOTT
WALTER H. WHEELER
C. S. WHITNEY (ex officio)
C. A. WILLSON
GEORGE WINTER
HOWARD M. ZIMMERMAN

(F. 3)
Appendix



APPENDIX

ABSTRACT OF REPORT OF ACI-ASCE JOINT COMMITTEE ON ULTIMATE STRENGTH DESIGN*

que es realmente una reimpresión de su contribución al Congreso Científico Mexicano de 1951 (conmemorativo del IV Centenario de la Universidad Autónoma de México de la que Félix Candela había sido catedrático) es una muestra clara del nivel de Candela en el tema. Este libro no solamente hace un análisis de la situación en la que en los años 40 y 50 estaba el cálculo estructural del hormigón, sino que apunta muchas ideas nuevas sobre los cambios necesarios. Cambios que se produjeron en un periodo relativamente corto.

En 1956 se publica la Norma norteamericana del hormigón ACI 318-56 titulada *Building Code Requirements for Reinforce Concrete* (Detroit 1956) (F. 2), y en ella aparece, por primera vez en el mundo, una norma con un anexo dedicado al Cálculo Plástico con Diagrama Rectangular (F. 3). No hay más que leer el libro de filosofía de las estructuras de Candela para darse cuenta de que, a través de su posición importante en el American Concrete Institute (ACI), Félix tomó parte en la elaboración de la nueva norma, o estaba perfectamente informado de los trabajos que estaba desarrollando la Comisión 318 para su redacción.

Del aspecto intuitivo hay que citar a Félix Candela como un intuitivo genial. Se nota especialmente en cómo resuelve los apoyos de cubiertas que, aún siendo de espesor muy pequeño, cubren grandes luces y por lo tanto transmiten grandes cargas a los apoyos puntuales. Félix Candela supo resolver esto con singular destreza en múltiples ocasiones.

Recuerdo una charla de Mario Salvadori, en la que hablando de la cubierta del MIT cuyo arquitecto era Eero Saarinen, sin que desgraciadamente tenga a mano el nombre del ingeniero, comentaba un aspecto que es evidente para cualquier persona que visite la cubierta, y es que realmente se trata de una estructura laminar, pero con una desafortunada solución de los apoyos en los que, a pesar del espesor general pequeño de la cubierta, a medida que se acerca a los tres puntos de apoyo, la estructura deja de trabajar como membrana y pasa a trabajar como lámina con fortísimos momentos flectores y va necesitando canto, creo recordar que hasta del orden de un metro. Mario Salvadori, con su ironía ácida y su humor, definía la situación diciendo "... ésta es una membrana que trabaja como una lámina y pesa como una bóveda".

De todas maneras con mi admiración por el arquitecto, por el intuitivo genial y por el profesional con una obra inmensa y original, mi recuerdo final de Félix Candela se centra definitivamente en él como ser humano, por su humildad y su bondad.

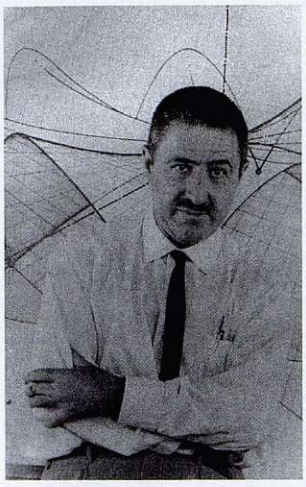
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

La forma estructural en la obra de Félix Candela

Enrique González Valle

Presidente de INTEMAC
Dr. Ingeniero, Profesor de la Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid UPM, España



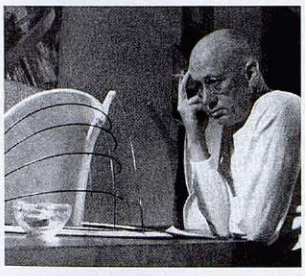
(F. 1)
Félix Candela

Introducción

El proyecto de una construcción parte de una serie de exigencias que en general son establecidas por parte de la propiedad. Tales exigencias vienen determinadas por condicionantes que podemos integrar en tres grandes grupos: urbanísticos y administrativos, funcionales y económicos.

Adoptando tales condicionantes como hipótesis de partida el autor del proyecto debe aplicar sus conocimientos, en general de tipo técnico, para dar, como respuesta al encargo, la solución que cumpla con las exigencias establecidas.

Es cierto que el proceso de proyecto de una construcción difiere radicalmente del proceso creativo de una obra de arte en sentido puro, escultura o pintura. La diferencia la encontramos, fundamentalmente, en la falta de exigencia, en las denominadas tradicionalmente como obras de arte, de los fuertes condicionantes funcionales y económicos que se establecen, en general, a los proyectistas de las construcciones para desarrollar su obra. Pero ello no quiere decir que no haya posibilidad de realizar creaciones artísticas en el mundo de la construcción: para ello los autores de los proyectos han tenido que marcarse exigencias propias para alcanzar el objetivo de que determinadas soluciones constructivas adquieran el reconocimiento de verdaderas obras de arte. Bien es verdad que para lograr el objetivo se requiere que los proyectistas tengan sensibilidad artística y, a la vez, que se hayan esforzado tomando en consideración los factores que condicionan la estética de la obra, pero en el caso de una construcción nunca se deben dejar de lado los otros factores complementarios a los que hemos hecho referencia, los funcionales y económicos.



(F. 2)
Eduardo Torroja

La integración de los condicionantes funcionales y estéticos en una obra es lo que ha supuesto que el mundo de la construcción en general, tanto en la arquitectura como en la ingeniería, haya aportado verdaderas obras de arte a lo largo de la historia, existiendo realizaciones de todas las épocas que son conceptuadas como tales. Eduardo Torroja (F. 2), en el prefacio a su obra *Las Estructuras de Eduardo Torroja*, señala la directriz común en la concepción de sus obras: "Mi objetivo final ha sido siempre que los aspectos funcionales, estructurales y estéticos de un proyecto formen una unidad integrada, tanto en esencia como en apariencia".

Las estructuras de las construcciones no quedan al margen de los conceptos que antes hemos expuesto. La solución estructural de que se dota a una construcción, para garantizar el cumplimiento de la función resistente que a ella se confía, no queda libre de los otros condicionantes funcionales y económicos e incluso de los que el autor del proyecto se imponga para que la solución tenga valor apreciable desde el punto de vista estético. En algunos casos en los que los factores estéticos puedan ser considerados como decisivos, se condiciona incluso la selección del autor del proyecto para exigir de él no sólo conocimientos técnicos puros, sino también dotes de creatividad artística. Pero ello debe hacerse con la precaución adecuada para que la creación artística esté basada en los principios que deben regir la selección de un sistema estructural para el proyecto de la construcción y, en particular, la selección de la forma y del material, a fin de garantizar el cumplimiento de la exigencia funcional de la resistencia requerida y permitir un proceso constructivo viable en la práctica. Todo ello compatibilizado con un coste que pueda ser asumido y esté optimizado, respetándose además las restantes exigencias funcionales a que la estructura deba responder.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Las fases de redacción de un proyecto

En muchas ocasiones he señalado las fases que podríamos identificar en el proceso de proyecto de una estructura, una vez establecidas las exigencias funcionales de la construcción:

1. Definición de las acciones
2. Establecimiento del esquema estructural
3. Selección de los materiales y de sus características
4. Predimensionado
5. Modelización de la estructura
6. Cálculo de solicitaciones
7. Comprobación y/o dimensionado de secciones y elementos
8. Estudio y definición de detalles específicos
9. Realización de la documentación gráfica, los planos
10. Redacción de las especificaciones de los materiales y procesos
11. Realización de mediciones y presupuestos

En general la fase 1, la definición de las acciones, no entraña dificultad ya que están reguladas y establecidas por normativa de cumplimiento obligado para la mayoría de las construcciones, tanto para las obras de edificación como para las de obra civil. Bien es verdad que en algunos casos la construcción deberá responder a exigencias no contempladas en la normativa, pero incluso en estos casos las exigencias las marcará el cliente autor del encargo quien las fijará con la asesoría de los técnicos.

El establecimiento del esquema estructural, fase 2, es tal vez la fase más creativa del proceso: en ella estableceremos cómo serán los mecanismos resistentes que dispondremos para soportar los efectos de las acciones, a fin de garantizar el comportamiento, en principio solamente estático, de la estructura. Los errores en esta fase condicionarán fuertemente la estabilidad estructural y en ella es donde nos jugamos la corrección o incorrección de la estructura en proyecto. Y unido a lo anterior debemos señalar la fase de selección del material y de sus características, fase 3, ya que representa otra fase de gran importancia: unos materiales serán más idóneos que otros para desarrollar determinados comportamientos estructurales derivados del esquema estructural seleccionado en la fase precedente.

Una vez definido el esquema estructural y seleccionado el material y sus características mecánicas, se aborda la fase 4, otra fase que es decisiva en el proceso, el predimensionado. Decimos que esta fase es importante dado que representa, para la estructura, la superación de una primera prueba, aunque preliminar, que nos permitirá dar fiabilidad a la garantía de comportamiento estático-resistente de la misma, todo ello basado en el esquema estructural seleccionado y bajo las acciones que la solicitan. Es un proceso que nos permitirá establecer las dimensiones de los elementos que componen la estructura, y tras su culminación podríamos decir que la estructura, si no está totalmente proyectada si está totalmente concebida.

Establecido el esquema estructural, seleccionado el material y definidas las dimensiones de los elementos, se aborda la modelización de la estructura, fase 5, como paso previo para el cálculo de solicitaciones y el dimensionado o comprobación de secciones y elementos, fases 6 y 7. Es una fase cuyo desarrollo requiere que el autor del proyecto tenga los conocimientos técnicos suficientes para desarrollar los modelos estructurales y su cálculo con el rigor suficiente y de acuerdo con el estado actual del conocimiento. Pero ello también está regulado en la normativa que rige estas fases del proyecto en los diferentes códigos, normas e instrucciones, que en general son aplicables a los distintos tipos de material estructural: hormigón estructural, acero, madera, fábricas. En otros casos de materiales novedosos habrá que recurrir a explorar el estado del conocimiento, en la literatura técnica aplicable, como es el caso de empleo de los materiales compuestos o "composites".

Las fases restantes, especificación de detalles, redacción de los planos, especificaciones, mediciones y presupuestos, fases 8 a 11, aunque sean importantes para la correcta especificación y valoración de la obra, no son desarrollos complejos en sí, y nos permiten contemplarla como una traducción de la solución concebida, predimensionada, calculada y dimensionada o comprobada, en sus aspectos resistentes, a un tipo de información que será transmitido al constructor como el necesario para construir y valorar la obra que ha sido proyectada.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

La forma y la concepción del esquema estructural: la intuición

Quiero señalar la importancia que la selección del esquema estructural tiene en el proceso de concepción y proyecto de una estructura. A ella le es aplicable plenamente lo que señala Eduardo Torroja en su magnífico tratado *Razón y Ser de los Tipos Estructurales*. Al comentar las bases a las que debe ajustarse el planteamiento estructural de una construcción señala: "... esquematizándolo en forma matemática podría decirse que se tienen las siguientes:

Ecuaciones	Incógnitas
Finalidad utilitaria	Material
Estatismo (Función estática)	Tipo estructural
Cualidades estéticas	Forma y dimensiones resistentes
Condiciones económicas	Proceso de ejecución

A estas ecuaciones han de añadirse las que podrían llamarse de compatibilidad, que establecen las mutuas exigencias e influencias de unas incógnitas en otras. Todas ellas hacen el sistema incompatible, en el sentido de que no es posible satisfacerlas todas plenamente o en todo el grado que se quiera; y es necesario conformarse con resolver el problema aproximadamente, limitando, al mínimo, los inconvenientes, y sacrificando, en parte, condiciones menos importantes. Solamente puede pretenderse que el sistema cierre con el mínimo error".

Es normal que el profano intente identificar en el proyectista de estructuras al científico, al técnico, ingeniero o arquitecto, con profundo conocimiento de la resistencia de materiales y de los métodos de cálculo que se establecen en los tratados de la Teoría de Estructuras, dando una importancia, tal vez desmedida, a las fases del proceso de redacción del proyecto que se refieren al cálculo estructural propiamente dicho, y no valorando la importancia que tienen las fases precedentes. Pero ello, que sería condición necesaria, no es suficiente: no basta. Lo reconoce Eduardo Torroja cuando señala que el proyectar estructuras, "... si bien tiene mucho de ciencia y de técnica, tiene mucho más de arte, de sentido común, de afición, de aptitud, de delectación en el oficio de imaginar la traza oportuna, a la que el cálculo sólo añadirá los últimos toques con el espaldarazo de su garantía estático-resistente".





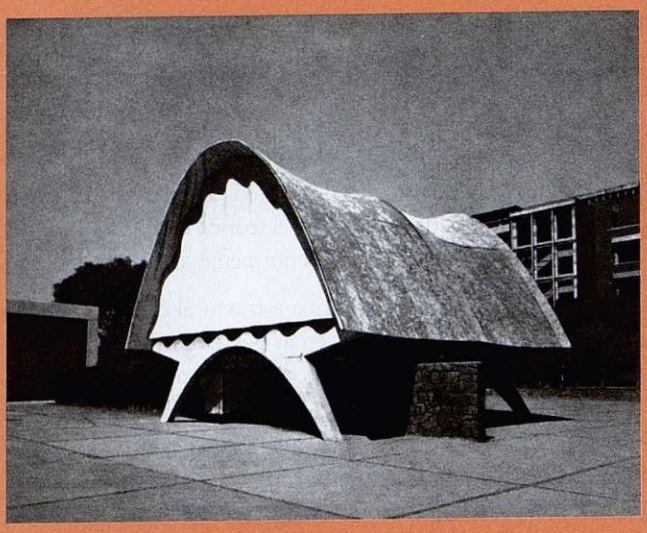


(F. 3)
Mercado de Algeciras
(F. 4)
Frontón Recoletos
(F. 5)
Hipódromo de la Zarzuela

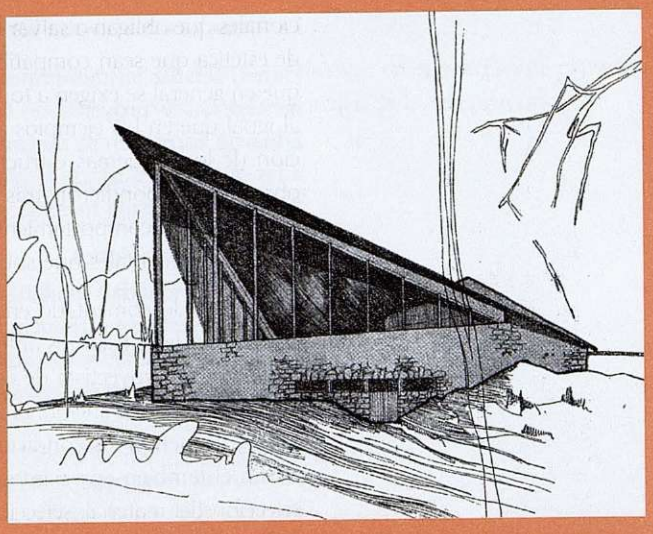
Él mismo lo aplica como norma en sus proyectos desarrollados en la década de los años 30 del pasado siglo. En la primera edición de su libro *Las estructuras de Eduardo Torroja, vistas por Eduardo Torroja*, publicado en primera edición en 1958, con prólogo de Mario Salvadori, comenta cómo nacen las formas de sus estructuras y cómo se justifican en particular algunas de las cubiertas laminares desarrolladas por él: Mercado de Algeciras (1933) (F. 3), Frontón Recoletos (1935) (F. 4), Hipódromo de la Zarzuela (1935) (F. 5). En todas ellas hace referencia a cómo se tomaron en consideración, en la fase de proyecto, las exigencias funcionales de servicio, las resistentes y las estéticas, que tuvo que compatibilizar para lograr una obra justificada en su esquema formal desde el punto de vista resistente y pretendiendo además alcanzar su optimización económica. Los comentarios no pueden ser más explícitos y el eficaz resultado alcanzado no puede ser más evidente.

No quiero dejar pasar la oportunidad que se me ofrece, ante la redacción de estas líneas para el libro conmemorativo del centenario de Félix Candela, para recalcar la importancia que las fases de concepción del esquema estructural, selección del material y predimensionado tienen en el proyecto de una estructura, máxime si la estructura está a la vista, si tiene condicionantes fun-

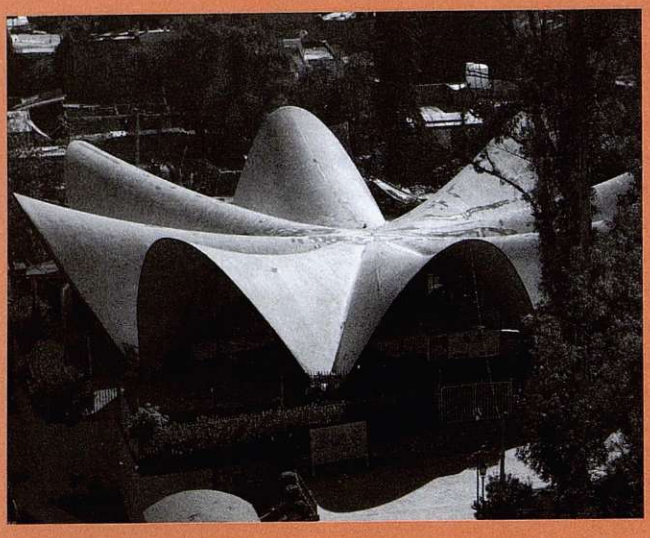
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



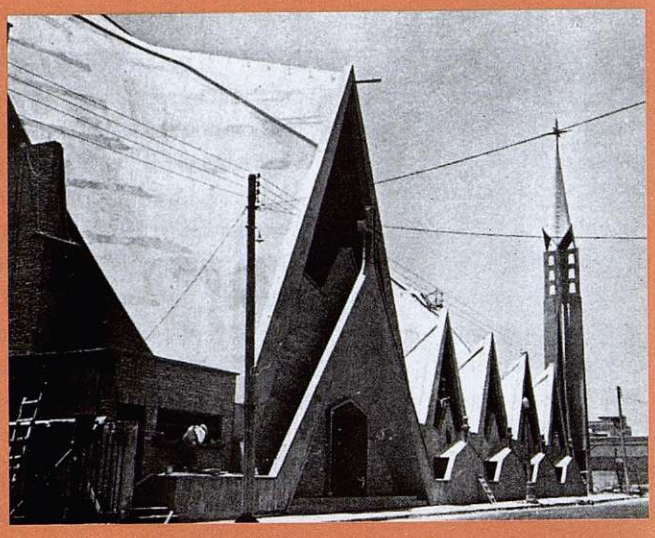
(F. 6)



(F. 7)



(F. 8)



(F. 9)



(F. 10)

(F. 6)
Laboratorio de Rayos Cósmicos
(F. 7)
Iglesia del "Altillo"
(F. 8)
Restaurante Los Manantiales en Xochimilco
(F. 9)
Iglesia de la Virgen de la Medalla Milagrosa
(F. 10)
Capilla de Las Lomas en Cuernavaca

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

cionales que obligan a salvar luces importantes y si, además, queremos revestirla de ciertas dotes de estética que sean compatibles con las exigencias de constructibilidad, resistencia y economía que en general se exigen a toda construcción. Porque si algo destaca en la obra de Félix Candela, al igual que en los ejemplos antes citados de la obra de Eduardo Torroja, es la oportuna selección de los esquemas estructurales y de los materiales y el correcto predimensionado de sus obras, que respondieron, tras su concepción, selección de material y predimensionado a las previsiones de su comportamiento estructural, confirmadas tanto a nivel teórico como tras los procesos experimentales que sobre las mismas se desarrollaron posteriormente a su concepción.

A la luz de lo comentado en relación con la selección de la forma estructural ¿como veríamos a Félix Candela? Estamos ante un personaje que se ve reflejado en lo que Eduardo Torroja define como un proyectista de estructuras, hombre al que a sus conocimientos técnicos se unía el sentido común, la afición, la aptitud, y la delectación en el oficio de plantear soluciones estructurales siguiendo los condicionantes estático-resistentes con fuertes dosis de creatividad artística. En él también apreciamos formas de proceder semejantes a las de Eduardo Torroja: tras la selección del material, selecciona de forma rigurosa la forma, analiza la viabilidad constructiva, realiza un análisis preliminar de su aceptable comportamiento estructural a nivel teórico, si resultase necesario realiza un análisis estructural más detallado y complementa sus actuaciones con un proceso experimental, sobre modelo o sobre elementos reales, para comprobar el ajuste a las previsiones teóricas del comportamiento estructural.

Hoy en día son accesibles, para todos los que proyectan estructuras, programas de ordenador que permiten calcular los esfuerzos, dimensionar secciones de todo tipo de material, comprobar elementos y realizar complejos cálculos de estabilidad, tomando en consideración modelos complejos de comportamiento de materiales, secciones, elementos y estructuras completas, contemplando incluso las no linealidades mecánicas y geométricas que rigen tales comportamientos, bien sean de carácter estático o dinámico. El abordar estos cálculos de forma manual diríamos que sería imposible para estructuras de la complejidad que tienen las estructuras laminares. Estos procedimientos de cálculo o de comprobación, a los que los proyectistas tienen acceso fácil hoy en día, no existían o no eran accesibles en la época en la que Félix Candela concibe sus primeras realizaciones, como tampoco lo eran en los momentos en los que ven la luz las más relevantes realizaciones de construcciones laminares de Eduardo Torroja.

Pero ambos coincidieron en la forma de hacer viables los procesos de proyecto de estructuras que tendrían una gran complejidad si su proyecto no se hubiese supeditado a la selección de una forma determinada que permitiese evaluar, al menos de forma preliminar y aproximada, los esfuerzos que se producirían ante las solicitaciones de las acciones.

Ambos acreditaron una buena formación teórica, sobre la base de un conocimiento profundo de la matemática y de la estática, complementada con conocimientos profundos sobre la resistencia de los materiales y el análisis estructural. Pero ambos no se basan prioritariamente para proyectar sus obras en procesos numéricos, sino que anteponen la concepción del esquema estructural a todas las otras fases del proceso. Y además, aunque reconocen la necesidad de conocer con detalle las bases del comportamiento estructural de la solución concebida, desconfían de los procesos numéricos, máxime si éstos son complejos, dado que circunstancias tales como el error o el desajuste entre el modelo numérico y la realidad las reconocen como posibilidades que pueden suceder.

A ello se refería Eduardo Torroja cuando en su *Razón y Ser de los Tipos Estructurales* señala: "Las teorías rara vez dan más que una comprobación de la bondad o del desarrollo de las fórmulas y proporciones que se imaginan para la obra. Éstas han de surgir primero de un fondo intuitivo de los fenómenos, que han quedado como un poso íntimo de estudios y experiencias a lo largo de la vida profesional".

Surge aquí un nuevo concepto importante para la concepción de una obra que deba integrar los aspectos funcionales, estructurales y estéticos: la intuición, pero no como un concepto que tiene su base en lo que podríamos señalar simplemente como una feliz idea que surge sin otros condicionantes previos. La intuición a la que Eduardo Torroja se refiere es la que se basa en el poso íntimo de estudios y experiencias a lo largo de una vida profesional, cimentada en unos buenos conocimientos sobre matemáticas, física, resistencia de materiales, teoría de estructuras y rigurosos métodos de cálculo. Esta intuición, en el sentido en la que la caracteriza Eduardo Torroja, no

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

es sino el reflejo de unos conocimientos técnicos bien cimentados, que hace surgir la idea brillante que permite compaginar adecuadamente los factores que deben ser considerados en la concepción de la obra. Y a este recurso del que dispone el autor del proyecto para concebir su obra, conocimiento latente o ciencia en reposo, Eduardo Torroja le otorga el mayor valor de entre todos los que el proyectista dispone para proyectar. Incluso supedita los restantes recursos, como es el caso de los métodos de cálculo, al proceso propiamente conceptual basado en el fondo intuitivo cuando señala: "El cálculo no es más que una herramienta para prever si las formas y dimensiones de una construcción son aptas para soportar las cargas a que ha de estar sometida" y "El cálculo no puede ser más que un método de comprobación y corrección de las dimensiones que a los elementos estructurales le ha dado la intuición del proyectista".

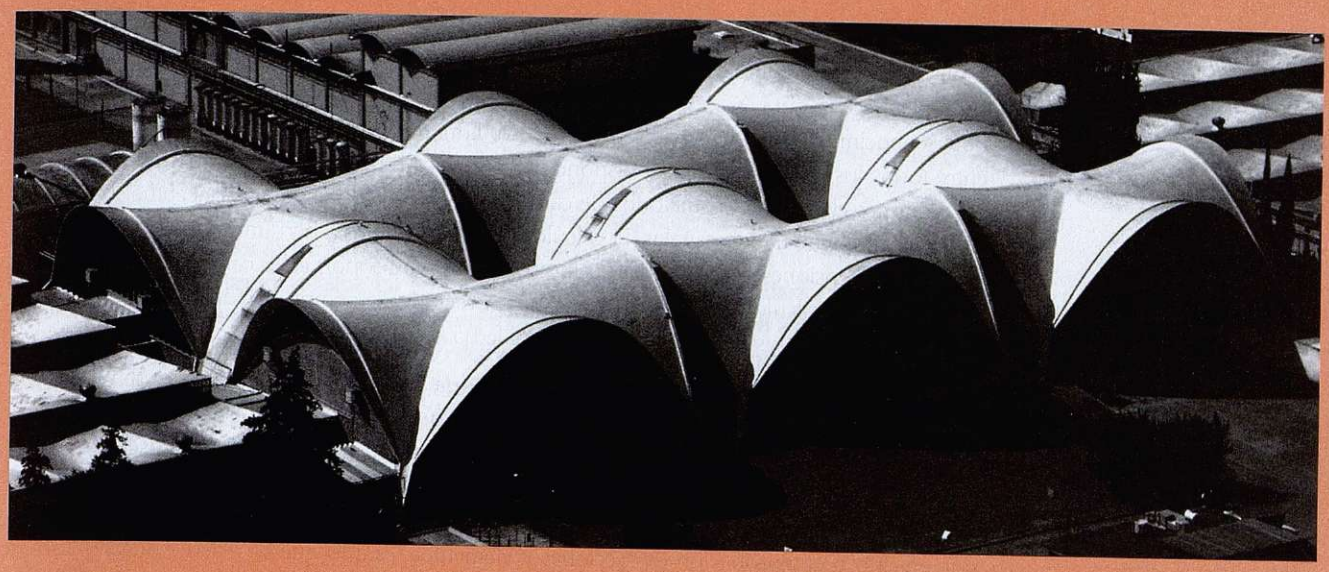
Todo ello porque, como buen conocedor de la teoría y de la posibilidad de que se produzcan errores humanos en toda actividad, sigue pensando que la fase de concepción de la estructura, que nos ha permitido definirla preliminarmente apoyándonos en las primeras fases del proceso de proyecto, establecimiento del esquema estructural y predimensionado, deben considerarse al menos tan decisivas como las fases de desarrollo del cálculo estructural detallado y dimensionamiento o comprobación de secciones y elementos. Es a lo que se refiere Eduardo Torroja cuando expone al referirse a los cálculos estructurales: "Cuanto más penosos sean los cálculos, más posibilidades hay de incurrir en una equivocación a lo largo de ellos. Por eso se necesita más práctica para estar seguros de detectar a ojo un error suficientemente importante... Si los cálculos coinciden con las ideas se tiene una garantía de aquéllos y de éstas".

En ello también se refleja el espíritu de Félix Candela: concibe la forma, selecciona el material y establece unas dimensiones previas. Sobre la base de estas actuaciones define y concreta la idea y a continuación desarrolla el proyecto para confirmar, más que para definir y concretar, las dimensiones de los elementos estructurales. Si hay coincidencia entre lo uno y lo otro, ideas y cálculos, se tiene garantía; en otro caso no hay porqué dudar sólo de las ideas sino que asimismo habría que cuestionar la modelización estructural o los propios procesos de cálculo de esfuerzos y dimensionado o comprobación, porque son tan susceptibles de error, o al menos de desviación significativa frente al comportamiento real de la estructura, como las ideas cuando menos. Todo ello para una concepción de la estructura desarrollada por un autor de proyectos que cumpla las condiciones referidas a la intuición a las que se refería Eduardo Torroja cuando expone sus ideas al efecto.

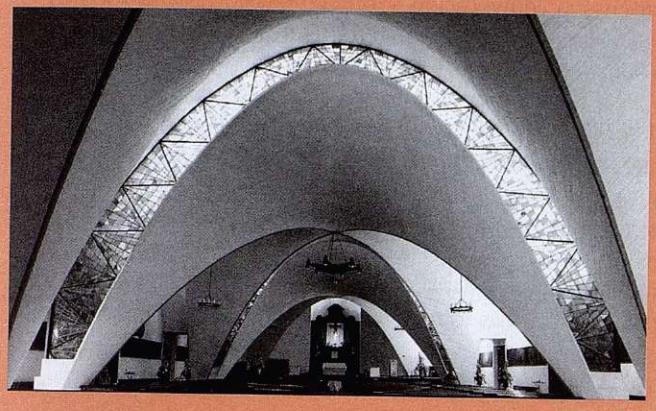
A este respecto quiero exponer algunas apreciaciones personales sobre la utilización de los potentes medios de que disponen los técnicos para el desarrollo de los cálculos estructurales. Hoy en día existen infinidad de programas de cálculo que permiten al proyectista de una estructura abordar el análisis estructural de soluciones estructurales muy complejas. Existen programas de cálculo estructural, basados en los métodos de elementos finitos, que permiten ser implementados en ordenadores de gran potencia, los cuales son accesibles a todo tipo de usuario y con coste muy reducido. Hemos asistido en las últimas décadas a una enorme evolución de los medios para realizar los cálculos, lo que ha permitido poner a disposición de cualquier técnico potentes métodos de cálculo, que permiten, a cualquier proyectista, desarrollar las fases de cálculo de esfuerzos, de dimensionamiento y de comprobación de secciones y elementos estructurales, con un gran rigor numérico. Las barreras que representaban las dificultades de tener que resolver los complicados problemas de análisis numérico a que conducía el análisis estructural de soluciones complejas han desaparecido, y en consecuencia podría parecer que cualquier técnico, apoyado en esos medios, es capaz de desarrollar, con gran precisión, soluciones estructurales complicadas, que antes sólo podrían ser analizadas por técnicos con gran conocimiento, no sólo estructural sino también matemático.

Para el profano, esto puede parecer que ha sido lo que ha permitido una evolución determinante en el proyecto de las estructuras, pero sólo si se contempla que el proyecto está integrado por las fases 5, 6 y 7 a que antes nos hemos referido al comentar las fases del proceso de proyecto. Nada más lejos de la realidad: las fases determinantes de un proyecto siguen siendo las de concepción del esquema estructural y predimensionamiento, y la utilización de los medios a los que nos hemos referido no han facilitado de forma directa la realización de estas fases. En consecuencia sigue siendo en el desarrollo de estas fases donde se sigue manifestando el buen proyectista. Esquemas estructurales simples, que admitan ser abordados mediante métodos simplificados con suficiente exactitud numérica, permiten concebir y desarrollar obras en

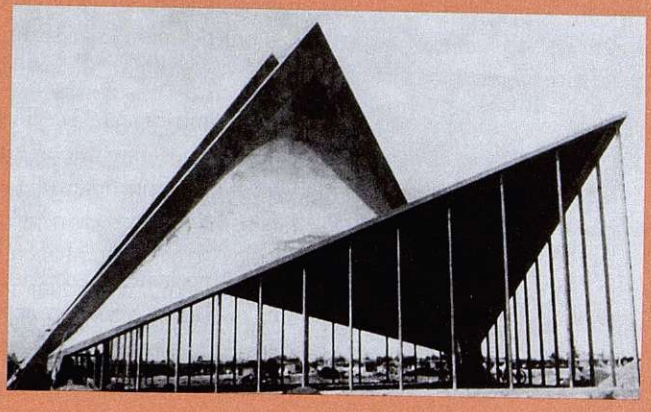
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



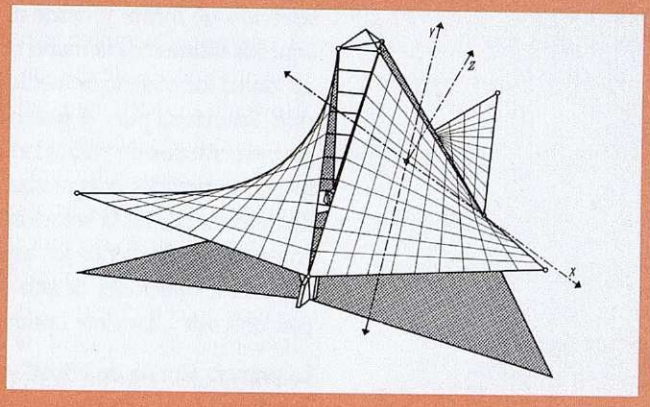
(F. 11)



(F. 12)



(F. 13)



(F. 14)

(F. 11)

Planta embotelladora de Bacardí en Cuautitlán Izcalli

(F. 12)

Capilla de San Antonio de Huertas

(F. 13)

Iglesia de San José Obrero

(F. 14)

Capilla de San Vicente Paúl en Coyoacán

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

las que se tomen en consideración los aspectos funcionales, resistentes y estéticos a la vez que su optimización desde el punto de vista de sus dimensiones y de su coste.

La aplicación de métodos de cálculo tradicionales, como métodos al menos de predimensionado, siguen estando vigentes en la actualidad por ser útiles para la comprobación de la idoneidad de los esquemas estructurales propuestos. Y no sólo consideramos esto como una posibilidad más para su aplicación en la fase adecuada del proceso de proyecto, sino como una herramienta necesaria. Un predimensionado correcto, aparte de confirmar la idoneidad del esquema estructural seleccionado, permitirá estimar los niveles de las solicitaciones, su signo y su incidencia en los estados tensionales de las secciones propuestas como predimensionamiento. Pero además nos dará una información muy útil para detectar si se han cometido errores en los procesos complejos de cálculo que se desarrollen en fases posteriores del proceso, lo que obligará a poner en duda y revisar no sólo la idea inicial sobre la estructura concebida y predimensionada sino también el propio proceso de cálculo detallado. Hay expertos que a tal objeto señalan que no debería calcularse con ordenador una estructura que el proyectista no supiese comprobar mediante métodos simplificados y procedimientos no informatizados.

La forma y la economía en las obras

Un aspecto importante y que ha resultado normalmente decisivo ante la realización de una obra es su optimización económica. Félix Candela abordó sus obras tomando en consideración tal aspecto de una forma decisiva. La situación en la que empieza su trabajo profesional en México es analizada por él y se propone desarrollar soluciones constructivas adaptadas al entorno socioeconómico que presenta México a finales de la década de los 40 y en los albores de la década de los 50 del siglo pasado.

Tomando en consideración el desarrollo de las tecnologías aplicables en la época, adopta el hormigón como material estructural, material que ya había demostrado su capacidad para realizar obras de formas versátiles acoplables a esquemas estructurales diversos: pero necesita optimizar las dimensiones de los elementos estructurales dada la enorme incidencia que tiene el peso del material en los esfuerzos que se originan en los elementos estructurales de cubiertas. Por otra parte para el desarrollo tecnológico de la época, el material tiene una incidencia relativa en el coste de las soluciones, mayor que la mano de obra. La solución la encuentra en la correcta selección de forma y desde el primer momento ve la solución en las cubiertas laminares. En aquellos momentos la mano de obra no es cara y permite soportar los costes relativos a su aplicación en los complejos medios auxiliares, encofrados y cimbrados necesarios para su construcción. Selecciona pues el material, concibe las formas aplicables, a la vez que las establece basándose en criterios de viabilidad constructiva, adoptando soluciones regladas que permitan encofrar las superficies, y optimiza de forma determinante los espesores para lograr la competitividad económica de la solución planteada. Un proceso totalmente ajustado y correcto, tomando en consideración todos los aspectos que deben ser considerados en un proyecto, y que además conduce a soluciones de alto rendimiento estético, que será reconocido por sus futuros clientes, con un coste altamente optimizado.

La primera lámina de Félix Candela se realizó en 1949, diez años después de su llegada a México. Se trataba de una lámina experimental, bóveda con trazado de catenaria, respondiendo a un esquema estructural muy simple. Tan convencido estuvo de que las soluciones que proponía permitían ser rentabilizadas que creó su propia empresa, Cubiertas Ala, para la realización de las obras que proyectaba. Comienza aquí la andadura de Félix Candela por el mundo de las estructuras laminares o "cascarones", y en 1951 implementa la primera realización no experimental: el Pabellón del Laboratorio de Rayos Cósmicos, bóveda de doble curvatura con un espesor de solamente 15mm (F. 6) a partir de cuya construcción, la empresa que el mismo creó, Cubiertas Ala, comenzó a recibir encargos cada vez más importantes, desarrollando los proyectos y construyendo una gran variedad de obras que resultaban atractivas desde el punto de vista estético, funcionales desde el punto de vista de su rendimiento estructural y competitivas desde el punto de vista económico.

La obra de Félix Candela: casos relevantes

Desde un punto de vista personal, haciendo un recorrido por sus obras me he permitido seleccionar, como muestra, un conjunto de diez de ellas, desarrolladas entre los años 1950 y 1960,

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

todas en México, que en mi opinión reflejan los valores de la forma y la importancia que concedió a la concepción estructural Félix Candela:

1953: Iglesia de San Pedro Mártir
1955: Iglesia de la Virgen de la Medalla Milagrosa (F. 9)
1955: Iglesia de Nuestra Señora de la Soledad
1956: Capilla de San Antonio de Huertas (F. 12)
1958: Restaurante Los Manantiales en Xochimilco (F. 8)
1958: Iglesia de Santa Teresa del Niño Jesús
1959: Capilla de Las Lomas en Cuernavaca (F. 10)
1959: Iglesia de San José Obrero (F. 13)
1960: Capilla de San Vicente Paúl en Coyoacán (F. 14)
1960: Planta embotelladora de Bacardí en Cuautitlán Izcalli (F. 11)

La muestra que presento recoge todo un elenco de formas estructurales correspondientes a soluciones laminares, en las que queda claramente reflejada la facilidad con la que Félix Candela compaginaba la estética con la idoneidad estructural de las soluciones que planteaba. Al observar en sus obras la facilidad con la que acoplaba el hormigón a los plegamientos necesarios con los que alcanzaba formas estructurales idóneas para este material, viene a la mente el aspecto más importante que manifiesta la obra de Félix Candela: haber respetado lo que Eduardo Torroja indicaba sobre la idea o concepción del esquema estructural. "Antes y por encima de todo cálculo está la idea, moldeadora del material en forma resistente, para cumplir su misión".

El legado que representa la obra de Félix Candela es de extraordinaria importancia: redactó o colaboró en más de 1.400 proyectos, de los cuales vieron culminada su realización cerca de 900, poniendo su ingenio para resolver de forma audaz y estética las múltiples obras que desarrolló como proyectista y constructor, o como colaborador integrado en equipos de proyecto y construcción.

Referencias

[1] Torroja E.: *Razón y ser de los Tipos Estructurales*, IETCC, Madrid.

[2] Torroja E.: *Las Estructuras de Eduardo Torroja*, Cedex-Cehopu-Ministerio de Fomento, Madrid, 1999.

[3] Jordá C. *et al*: *Eduardo Torroja, la vigencia de un legado*, Universidad Politécnica de Valencia, 2002.

[4] Andrés Martín F.R. *et al*: *Análisis Gráfico de obras emblemáticas de Félix Candela*, Proced. XVI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica.

[5] Candela F.: *En defensa del formalismo y otros escritos*, Xarait Ediciones, Bilbao, 1985.

[6] Seguí Buenaventura M.: *Félix Candela, Arquitecto*, MOPTMA-Fundación Juan de Herrera, 1994.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Félix Candela: ingeniería y arquitectura bajo un mismo paraguas

Florencio J. del Pozo Vindel
Presidente de PROES Consultores S.A.
Prof. Dr. Ingeniero Universidad Politécnica de Madrid UPM, España

Aunque nació en Madrid, la vida de Félix Candela transcurrió entre México, Estados Unidos y España. De la misma forma, aunque obtuvo el título de Arquitecto, su carrera profesional se desarrolló en los campos de la arquitectura y la ingeniería, y a él mismo le gustaba definirse como constructor. Es difícil asignar a Félix Candela una etiqueta concreta en cuanto a nacionalidad o filiación profesional, quizás tan difícil como intentar describir su enorme talento y sus valiosas aportaciones estéticas y estructurales a la obra civil, en un artículo de extensión limitada. En todo caso, lo intentaremos en estas líneas.

En cuanto a su quehacer profesional, los casi 88 años de vida de Félix Candela (1910-1997) pueden dividirse en tres periodos, de parecida duración, correspondientes a sus residencias en España, México y Estados Unidos, aunque el grueso de su obra construida se inscribe en el segundo de estos periodos, el de su residencia en México.

La primera etapa comprende desde su nacimiento en Madrid, el 27 de enero de 1910, hasta su asentamiento en México al término de la Guerra Civil española, en junio de 1939. Durante este periodo obtuvo el título de arquitecto en la Escuela de Madrid (1935) y al año siguiente una beca, que nunca disfrutaría, para estudiar en Alemania. El desencadenamiento de la Guerra Civil dio al traste con dichos planes, ya que fue reclutado por el bando republicano, siendo nombrado capitán de ingenieros. Al final de la guerra, Candela pasó cuatro meses internado en un campo de concentración francés, hasta que consiguió asilo en México, trasladándose allí.

Durante sus diez primeros años de estancia en México se casó (1941) con Eladia Martín, su novia española que le había acompañado en el exilio, y entabló relaciones con los hermanos Fernando y Raúl Fernández Rangel, ambos arquitectos, con los que fundó en 1950 la empresa constructora Cubiertas Ala (F. 1). Sin embargo, tres años después, en 1953, se disolvería la sociedad con los hermanos, haciéndose cargo Candela de la dirección de la empresa, que seguiría funcionando hasta 1976, aunque desde 1969 sería dirigida por Antonio Candela, tras el abandono de su hermano Félix.

Cubiertas Ala tuvo una gran actividad, construyendo centenares de obras proyectadas por Candela y alcanzando su máximo apogeo con la construcción del Palacio de los deportes de México para las Olimpiadas de 1968.

Desde el primer momento, Candela tuvo un enorme interés en cuidar su imagen, dando a conocer su obra mediante comunicaciones a congresos internacionales, conferencias y, sobre todo, mediante la publicación de artículos en el American Concrete Institute (ACI), lo que le granjeó una merecida fama internacional, que le permitió ir obteniendo cada vez más encargos fuera de México.

En 1968, cinco años después de la muerte de su esposa Eladia, Candela contrajo matrimonio con la norteamericana Dorothy Davies, también arquitecto. Esta circunstancia, junto con sus cada vez más frecuentes estancias en el extranjero, hizo que, progresivamente, fuera disminuyendo su implicación en la empresa constructora, que terminó abandonando, como se ha indicado, en 1969. Dos años más tarde, en 1971, emigró de nuevo, esta vez a Estados Unidos, para instalarse en Chicago.

En esta última etapa de su vida se involucró de forma importante con la enseñanza, dando clases como profesor de Proyectos Arquitectónicos en la universidad de Chicago, en Illinois, hasta el año 1978. No descuidó sin embargo su labor como proyectista, que desarrolló a través de la

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



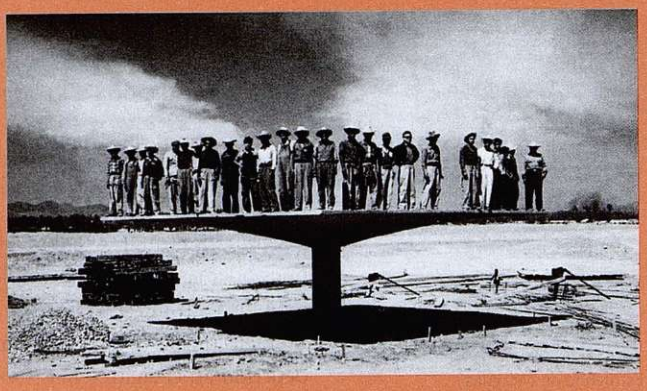
(F. 1)



(F. 4)



(F. 3)



(F. 6)

(F. 1)

El cartel de Cubiertas Ala
en el Laboratorio de Rayos Cósmicos
durante su construcción

(F. 3)

Apoyos laterales en la Iglesia de Nuestra
Sra. de la Medalla Milagrosa

(F. 4)

Vista exterior del Laboratorio de Rayos
Cósmicos

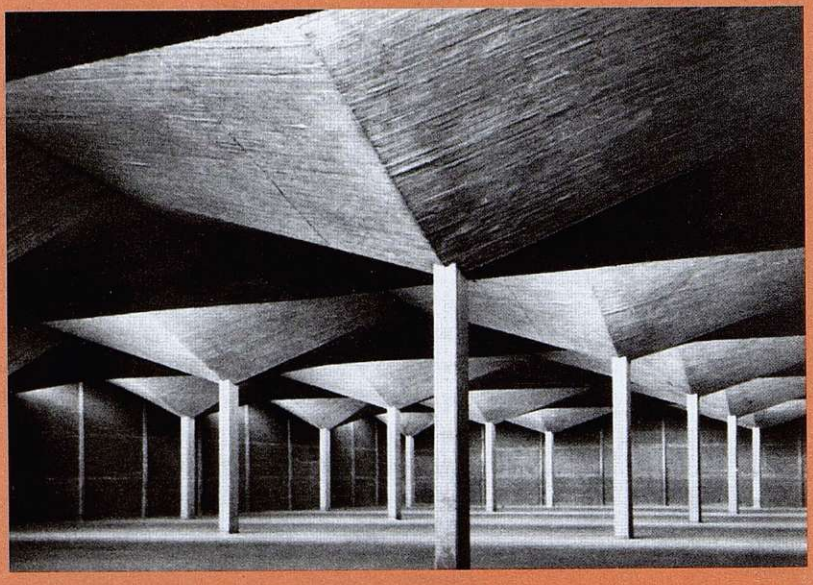
(F. 6)

Prueba de carga de una estructura
en paraguas

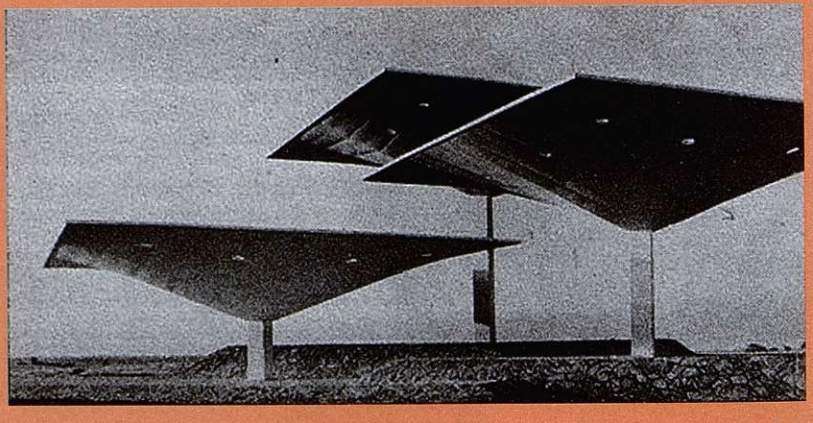
(F. 7)

Almacén de Celestino Fernández Vallejo
en México D.F.

(F. 8)
Portada del Parque industrial Great
Southwest en Texas

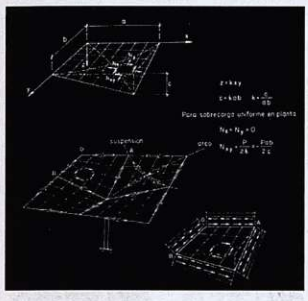


(F. 7)



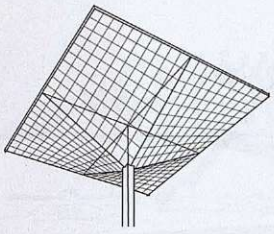
(F. 8)

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO



(F. 2)

Planteamiento teórico para el cálculo de esfuerzos en una estructura en paraguas



(F. 5)

Estructura en paraguas

firma estadounidense Idea Center, con sede en Toronto. En esta época realizó numerosos proyectos de gran importancia, aunque la mayoría de ellos no llegaron a construirse.

Uno de los últimos proyectos en los que intervino fue la Ciudad de las Artes y de las Ciencias de Valencia, donde colaboró con el conocido arquitecto Santiago Calatrava, haciéndose cargo del proyecto y la obra del edificio del Oceanográfico. Durante la dirección de estas obras, que concluyeron cinco años después de su muerte, tuvo una recaída de una vieja dolencia del corazón que le hizo volver a Estados Unidos para recibir atención médica en el hospital Duke de Raleigh, en Carolina del Norte, a donde había trasladado su residencia en 1990 y donde murió en diciembre de 1997.

La figura de Félix Candela estuvo sometida a gran discusión, tanto por parte de algunos ingenieros, como por parte de los propios arquitectos, aunque, como se ha indicado anteriormente, su formación académica fuera de arquitecto. Resulta cuando menos curioso que su último gran proyecto lo realizara en colaboración con otro creador cuya adscripción a la ingeniería o a la arquitectura resulta, en la actualidad, objeto de un encendido debate del mismo tipo del que suscitó Félix Candela a lo largo de su vida.

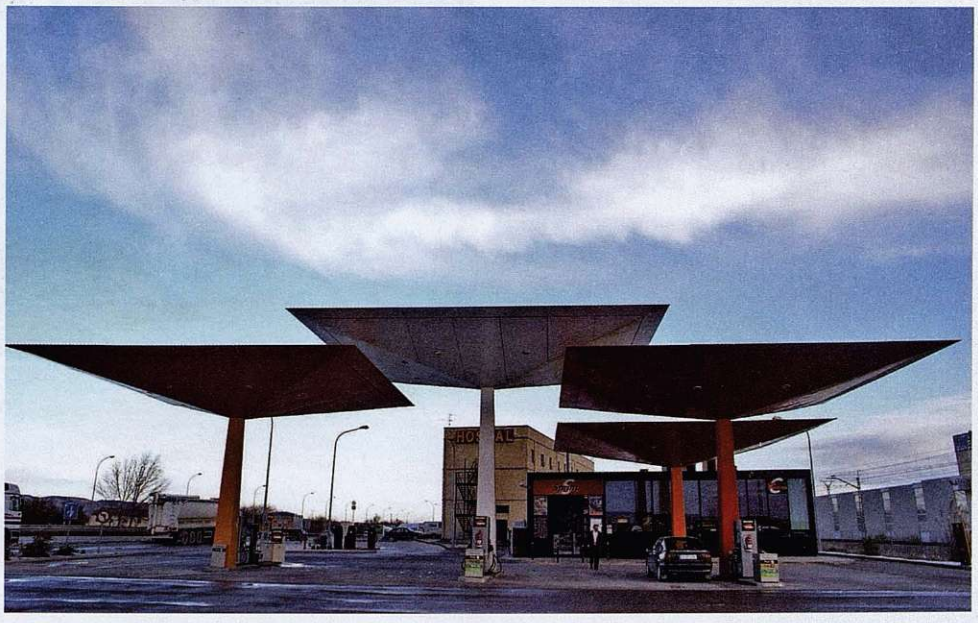
Algunos arquitectos han argumentado que Candela fue un magnífico ingeniero estructuralista, pero que su escasa o nula preocupación por otros aspectos de sus obras (instalaciones, acabados, texturas, etc.), que encargaba a sus colaboradores, no le permite figurar en la nómina de los grandes arquitectos. Por el contrario, algunos ingenieros no le reconocían como uno de ellos, pues además de su carencia de titulación, le achacaban unos conocimientos estructurales muy limitados. En nuestra opinión, ninguna de estas dos posturas resulta totalmente razonable. Félix Candela quiso, y lo logró, situarse en un momento previo a la separación de ambos oficios, ocurrida en el siglo XVIII.

Candela se autodefinió siempre como un constructor. Según sus propias palabras, además de constructor, él era un contratista de obras. No es extraño, por lo tanto, que las dos líneas fundamentales de sus proyectos fueran siempre la optimización de la eficiencia estructural y la economía entendida en un sentido amplio, de minimización de los materiales empleados y de los costes de su puesta en obra. Este interés en las facetas más ingenieriles de sus obras no le hizo olvidar la estética de las mismas, su aspecto arquitectónico y, aunque él mismo no se consideraba un arquitecto, resulta indudable que Félix Candela es una de las figuras señeras de la arquitectura del siglo XX. Su obra puede considerarse, por lo que respecta a la creación de espacios arquitectónicos, en pie de igualdad con la de otros monstruos sagrados en este aspecto, como Pier Luigi Nervi, Eero Saarinen, Oscar Niemeyer o Jørn Utzon.

Por lo que respecta a los criterios de comprobación de la resistencia estructural de sus cubiertas, Félix Candela adoptó como paradigma diseñar sus cubiertas laminares trabajando en estado membrana o, lo que es lo mismo, sólo mediante esfuerzos contenidos en la superficie media

(F. 9)

Interpretación de estructuras en paraguas en una estación de servicio de Repsol



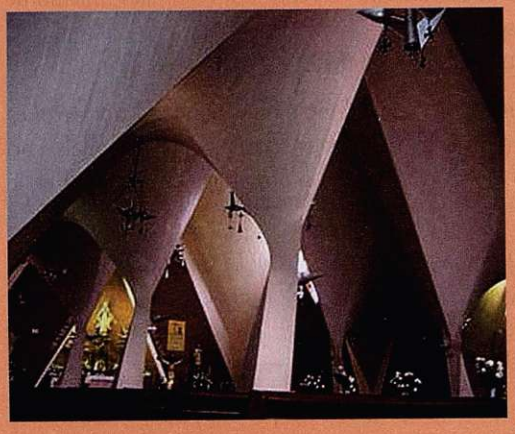
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



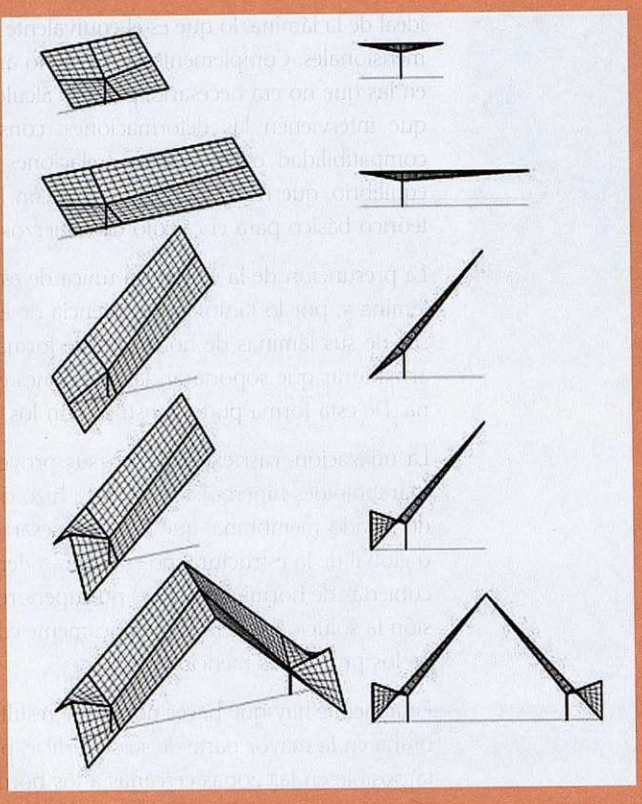
(F. 11)



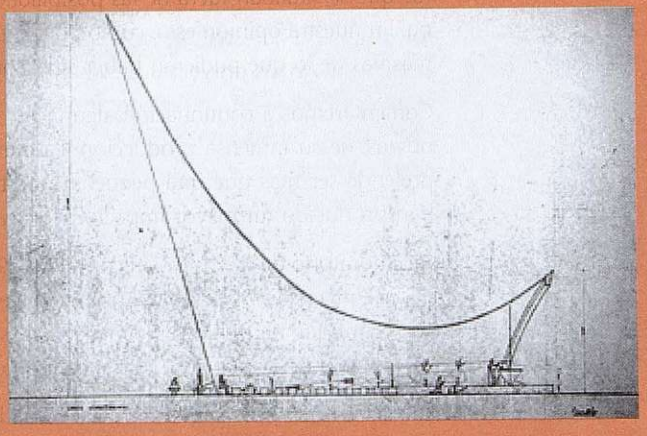
(F. 12)



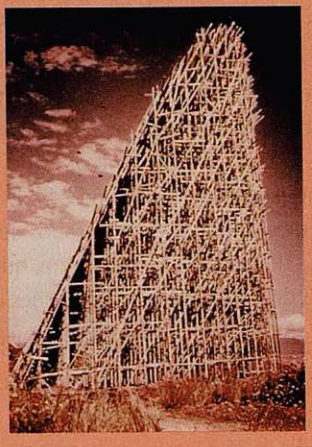
(F. 13)



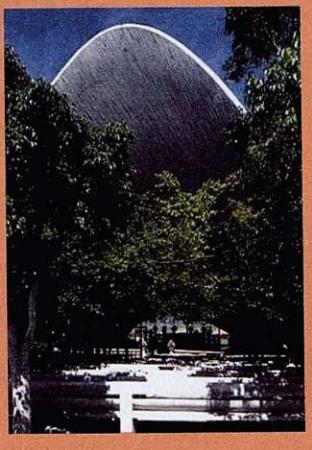
(F. 10)



(F. 14)



(F. 15)



(F. 16)

(F. 10)

Deformación de una estructura en paraguas

(F. 11)

Vista exterior de la Iglesia de Nuestra Sra. de la Medalla Milagrosa

(F. 12, 13)

Vistas interiores de la Iglesia de Nuestra Sra. de la Medalla Milagrosa

(F. 14)

Boceto original de Candela de la Capilla de Lomas de Cuernavaca

(F. 15)

Cimbra de madera durante la construcción

(F. 16)

Aspecto de la superficie del hormigón

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

ideal de la lámina, lo que es el equivalente tridimensional de las estructuras antifuniculares bidimensionales. Complementaba el criterio anterior con el uso extensivo de estructuras isostáticas en las que no era necesario, para el cálculo de sus esfuerzos, el empleo de las ecuaciones en las que intervienen las deformaciones: constitutivas (relaciones esfuerzos-deformaciones) y de compatibilidad o cinemáticas (relaciones movimientos-deformaciones), bastando con las de equilibrio, que relacionan las cargas con los esfuerzos. En la (F. 2) se aprecia el planteamiento teórico básico para el cálculo de esfuerzos en una estructura en paraguas.

La presunción de la existencia única de esfuerzos contenidos en la superficie media ideal de la lámina y, por lo tanto, la inexistencia de esfuerzos de flexión, le permitió dimensionar el espesor de sus láminas de hormigón de forma estricta para soportar las compresiones y disponer armaduras que soportaran las tracciones en una única capa centrada en el espesor de la lámina. De esta forma pudo construir con los reducidísimos espesores que caracterizan su obra.

La utilización, casi exclusiva en sus proyectos, de superficies cuádricas de curvatura negativa (paraboloides hiperbólicos o *hypar*), hizo que los efectos no evaluables mediante las ecuaciones del estado membrana, que él había desarrollado, como podían ser los efectos de pandeo local o global de la estructura, no revistieran demasiada importancia. Su propia autolimitación de las cubiertas de hormigón a luces no superiores a 30m, ya que opinaba que a partir de esta dimensión la solución no era económicamente competitiva, redundaron asimismo en la minimización de los problemas mencionados.

Finalmente, hay que hacer notar que resulta factible hacer trabajar una lámina en estado membrana en la mayor parte de su superficie, pero, salvo condiciones muy concretas, esto no resulta posible en las zonas cercanas a los bordes y a los apoyos. En estas zonas intervenía la gran intuición estructural de Candela, que siempre disponía en ellas refuerzos de espesor y armaduras que se situaban fuera de las posibilidades de cálculo de sus ecuaciones de estado membrana. En nuestra opinión esto, como puede verse en la (F. 3), hacía que estas zonas resultaran más masivas de lo que pudieran haber sido con una evaluación más refinada de sus esfuerzos.

Comentaremos a continuación algunas de sus obras como ejemplo, muy limitado por razones obvias, de su inmensa producción. La selección de las mismas es estrictamente personal y no pretende ser más que una pequeña muestra de aquellas que al autor, ingeniero estructural, le han producido un mayor impacto personal.

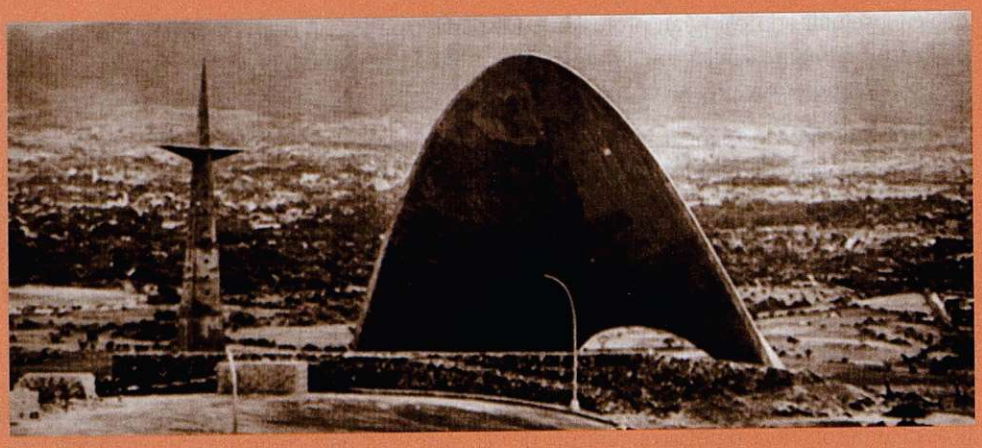
El Laboratorio de Rayos Cósmicos (1951-1952), situado en el campus de la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México, es una de las primeras obras de Candela (F. 4). Aunque de reducidas dimensiones, sólo 10x13m, resuelve de una manera muy elegante el complejo problema arquitectónico planteado.

El edificio debía contener un aparato contador de radiaciones solares, para cuya protección debía situarse bajo una estructura rígida, sin que ésta produjese un apantallamiento de las radiaciones que debían medirse. El encargo consistió en la construcción de una cubierta de hormigón de unos pocos centímetros de espesor. Candela cambió el proyecto preliminar, consistente en una bóveda cilíndrica, por dos paraboloides hiperbólicos sustentados por tres arcos parabólicos. Esta configuración de tela tendida permitía una forma de trabajo fundamental a tracción sin flexiones, estado membrana, que podía ser soportado por las armaduras dispuestas, en una sola capa, en el interior de la lámina, cuyo espesor es de 15mm, siendo una de las estructuras permanentes de menor grosor existentes en el mundo. En la actualidad sigue prestando servicio, sin daños estructurales aparentes, aunque ya no aloja los aparatos originales y ha sido habilitada para otras funciones. Podría decirse que con esta obra, que empezó a darle a conocer a nivel mundial, Candela proyectó una de las primeras realizaciones de lo que actualmente se conoce como ferrocemento.

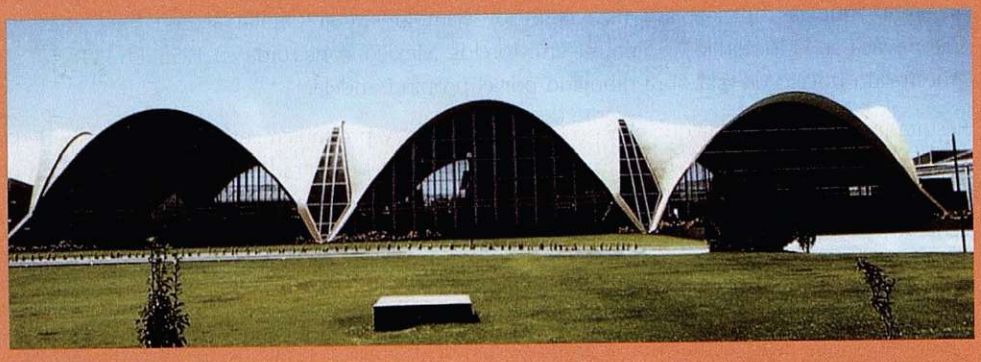
Una gran parte de la obra de Félix Candela está basada en la utilización de los denominados "paraguas" (F. 5) y sus derivados, que son estructuras formadas por cuatro hojas de paraboloide hiperbólico montadas sobre una planta cuadrada y con una sustentación mediante un único pilar central. En la (F. 6) puede observarse la curiosa prueba de carga realizada en un módulo de prueba para la construcción, en 1953, de la cubierta de un almacén (F. 7) para Celestino Fernández Vallejo, en México D.F.

Esta solución fue empleada en la portada del parque industrial Great Southwest en la ciudad de Dallas, en Texas, construida en 1958 (F. 8). La solución sigue estando de plena actualidad,

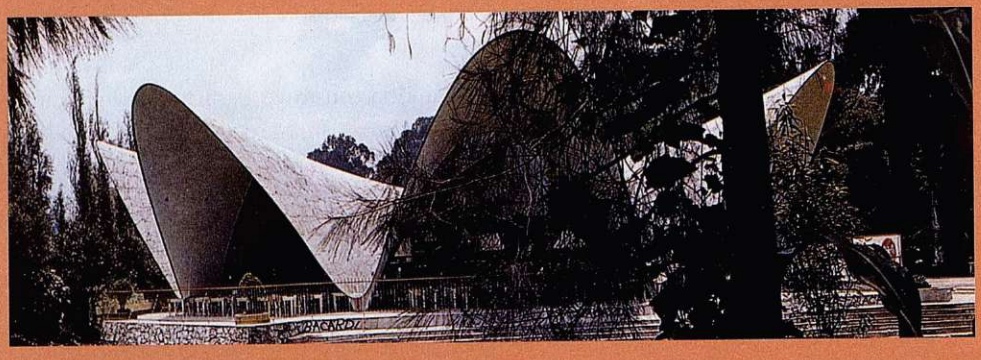
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



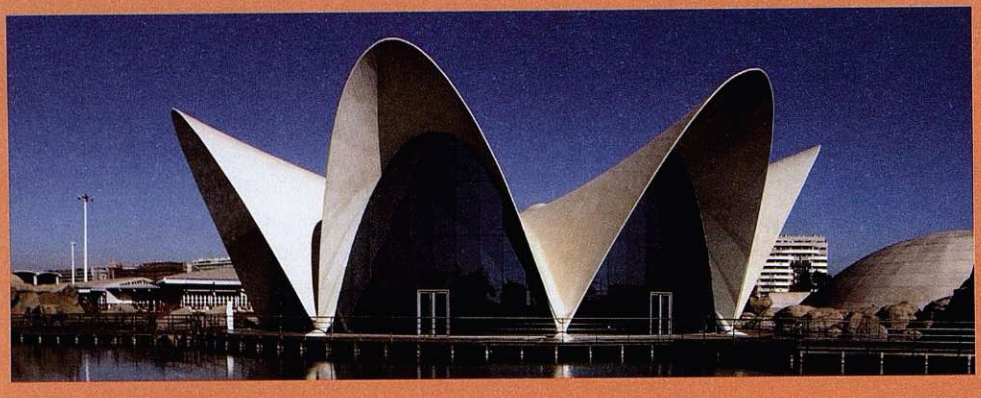
(F. 17)



(F. 18)



(F. 19)



(F. 20)

(F. 17)

Vista general de la Capilla de Lomas de Cuernavaca

(F. 18)

Planta de embotellado de Ron Bacardí en Cuautitlán

(F. 19)

Restaurante Los Manantiales en Xochimilco

(F. 20)

Oceanográfico en la Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

habiéndose utilizado con gran profusión en España, para la cubierta de estaciones de servicio de Repsol (F. 9), una similar, en la que se han sustituido los paraboloides hiperbólicos por planos, resultando estructuralmente menos eficiente y, en mi opinión, menos elegante.

La deformación de los paraguas (F. 10) permitió a Candela proyectar gran número de estructuras de diferentes características, entre las que cabe destacar la iglesia de Nuestra Señora de la Medalla Milagrosa (F. 11).

Esta cubierta, construida entre 1953 y 1955 en un barrio residencial de México D.F., es, en nuestra opinión, una de las cimas de la arquitectura moderna internacional por la grandiosidad del espacio interior que produce el efecto de irse elevando hacia el altar, suponiendo una inspiradísima reinterpretación de los principios del estilo gótico (F. 12, 13).

Finalmente, existe otro conjunto de obras formado por la utilización de paraboloides hiperbólicos de una sola hoja, o por acoplamiento de varias de ellas, para configurar cubiertas de forma más libre que las anteriores. Quizá el mejor ejemplo sea la Capilla abierta de Lomas de Cuernavaca en la localidad de Palmira, en Morelos, México, construida en 1958. En la (F. 14) se muestra un boceto de esta obra dibujado por el propio Candela.

Resulta importante señalar que el aspecto más delicado, y probablemente el más costoso, de la construcción de este tipo de estructuras, es la ejecución del encofrado de madera (F. 15) con el que se hormigona la lámina (F. 16), que generalmente aprovecha la existencia de dos familias de generatrices rectas en este tipo de superficies. Candela contó en su empresa con un equipo de carpinteros de una excepcional calidad, encabezado por Guadalupe Valencia y Lucio Jiménez, a quienes dirigía personalmente.

Esta obra resulta espectacular por la grandiosidad del espacio conseguido con un solo elemento de apariencia sencilla. Las dimensiones en planta del edificio son 20x30m aproximadamente y la visera frontal alcanza 22m de altura (F. 17).

Mediante la unión de láminas de este mismo tipo, Candela construyó estructuras de gran interés, como la planta de embotellado de Ron Bacardí en Cuautitlán, México (F. 18), construida en 1959 y formada por seis módulos de planta cuadrada de 30m de lado, constituyendo una retícula de 2x3 módulos. Cada módulo está formado por la intersección de dos paraboloides hiperbólicos, remedando la solución románica clásica de la bóveda de crucero. El espesor en el centro es alrededor de 4cm.

Del mismo tipo, pero uniendo un mayor número de hojas de paraboloide hiperbólico, es la cubierta del restaurante Los Manantiales, en Xochimilco, México (F. 19), construida en 1957. Finalmente, esta misma solución la repitió en una de sus últimas obras, ya mencionada, que es la cubierta del Oceanográfico de la Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia (F. 20).

Otras muchas realizaciones podrían ilustrar la vida profesional de Félix Candela y cada una de ellas corroboraría la audacia y la originalidad de su autor. Esperamos que con las aquí expuestas el lector puede hacerse una idea de la importancia de la figura de este constructor.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

El formalismo de Félix Candela

José María Goicolea Ruigómez

Dr. Ingeniero, Catedrático de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid UPM, España
Vocal de la comisión asesora de la Fundación Juanelo Turriano

Félix Candela ha sido una figura excepcional en el ámbito general de la ciencia de la construcción, por lo que, y con ocasión del centenario de su nacimiento el 27 de enero de 1910, se aporta aquí un análisis sobre algunos aspectos de su obra y de sus postulados. En primer lugar se resalta el compromiso de Candela no sólo como arquitecto sino también como constructor, ingeniero y artista. Se detallan asimismo algunos aspectos de su formación en la Escuela de Arquitectura de Madrid en los años 30 que marcaron su carácter. A continuación se analizan algunas de las ideas principales de Candela alrededor del formalismo y del papel de la arquitectura, ingeniería y métodos de cálculo en el diseño estructural. Por último, y partiendo de los modelos de cálculo estructural de láminas empleados por Candela, se analizan algunas de sus propuestas y obras con modelos numéricos de elementos finitos.

Candela: ¿arquitecto, constructor, ingeniero o artista?

Candela fue un arquitecto atípico, por distintos motivos. Su obra más relevante fue realizada como constructor de cubiertas laminares en Cubiertas Ala, propiedad suya y de sus hermanos, en la cual promovía, diseñaba, calculaba y se comprometía económicamente con sus propias creaciones. Su obra y sus propuestas estuvieron guiadas por requisitos funcionales y económicos, siempre con una base sólida de mecánica estructural. En 1955 Candela afirma [1]: "Debo aclarar en primer lugar que, aunque soy arquitecto por educación, mi actividad profesional es la de constructor o contratista de obras, y por tanto mis preocupaciones sobresalientes son, por lo general, de tipo económico".

Su colaborador Colin Faber, en su excelente libro [2], lo titula como constructor de láminas. Según Faber, "la cuestión sobre si Candela es un arquitecto, ingeniero, matemático es más bien académica. Cuando se le pide definirse es proclive a responder: "Soy un contratista, trabajando en lo que realmente me gusta, lo que es una situación muy feliz". La identificación de Candela con la ingeniería proviene tanto de su capacidad matemática para el cálculo como de su compromiso con la mecánica estructural como base del diseño, además de los factores estéticos. En un reciente y muy cuidado libro Garlock y Billington [3], tras un detallado análisis de su vida y obra, reivindican su calificación como artista estructural, concepto que definen como "un ingeniero con todas las cualidades de un maestro de obras y que posee adicionalmente motivación estética".

El logro principal de Candela fue la realización de su obra arquitectónica de manera económica, funcional y al mismo tiempo bella, superando las importantes dificultades de la guerra y el exilio, con el mérito añadido de la modestia, sinceridad y honestidad [4].

"... mi mayor satisfacción no estriba en haber ejecutado ciertas estructuras espectaculares –aunque confieso que he disfrutado mucho haciéndolas–, sino en haber contribuido, siquiera sea en forma mínima, a aliviar el ingente problema de cubrir económicamente espacios habitables, demostrando que la construcción de cascarones no constituye una hazaña extraordinaria que inmortalice a sus autores, sino un procedimiento constructivo sencillo y flexible"

La formación de Candela en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

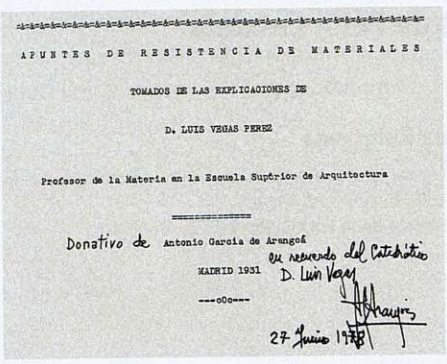
La formación recibida condiciona la trayectoria profesional o científica, permitiendo abrir algunas puertas o por contra cerrando otras. Esta reflexión nos da pie para aportar a continuación algunos datos sobre la formación recibida por Candela y de sus estudios de Resistencia de Materiales.

Colaboración en los cálculos de Pablo Antolín Sánchez, Alfredo Cámara Casado y Javier Oliva Quecedo, Ingenieros de Caminos y estudiantes de doctorado.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 1)

Portada y página interior de los apuntes de Resistencia de Materiales [6] de Luis Vegas Pérez (1931) tomados por A. García de Arangoá



APUNTES DE RESISTENCIA DE MATERIALES

TOMADOS DE LAS EXPLICACIONES DE

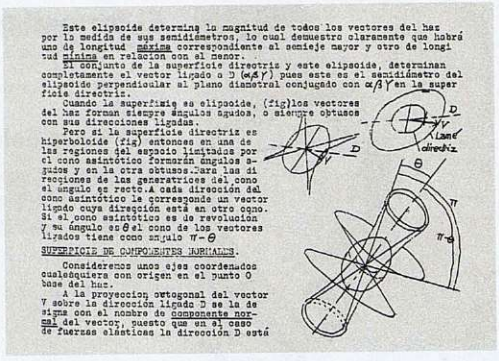
D. LUIS VEGAS PEREZ

Profesor de la Materia en la Escuela Superior de Arquitectura

Donativo de Antonio García de Arangoá en recuerdo del Catedrático D. Luis Vegas

MADRID 1931

27 Junio 1978



Este elipsoide determina la magnitud de todos los vectores del haz por la medida de sus semidiámetros, lo cual demuestra claramente que habrá uno de longitud máxima correspondiente al semieje mayor y otro de longitud mínima en relación con el menor.

El conjunto de la superficie directriz y este elipsoide, determinan completamente el vector ligado a D ($\alpha\beta\gamma$) pues este es el semidiámetro del elipsoide perpendicular al plano diametral conjugado con $\alpha\beta\gamma$ en la superficie directriz.

Cuando la superficie es elipsoide, (fig)los vectores del haz forman siempre ángulos agudos, o siempre obtusos con sus direcciones ligadas.

Pero si la superficie directriz es hiperboloide (fig) entonces en una de las regiones del espacio limitadas por el cono asintótico formarán ángulos agudos y en la otra obtusos.Para las direcciones de las generatrices del cono el ángulo es recto.A cada dirección del cono asintótico le corresponde un vector ligado cuya dirección está en otro cono. Si el cono asintótico es de revolución y su ángulo es θ el cono de los vectores ligados tiene como ángulo $\pi - \theta$

SUPERFICIE DE COMPONENTES NORMALES.

Consideremos unos ejes coordenados cualesquiera con origen en el punto O base del haz.

A la proyección ortogonal del vector V sobre la dirección ligada D se la designa con el nombre de componente normal del vector, puesto que en el caso de fuerzas elásticas la dirección D está

"La idea de dedicar un curso entero de seis horas a la semana para estudiantes de arquitectura, a una materia, casi totalmente abstracta, que se iniciaba con el maravilloso artificio geométrico de la Teoría de Tensores, sin explicarnos de antemano para qué iba a servir, parece bastante absurda, aunque para mí fue providencial, porque, al mostrarme los ingeniosos fundamentos de los métodos de cálculo de estructuras, me proporcionó un arma muy valiosa para mis discusiones futuras con profesores e ingenieros y, también, para poder juzgar con más autoridad sobre la idoneidad, en cada caso, de tales métodos, y modificar o desarrollar algunos otros para mi propio uso"

Félix Candela es admitido en la Escuela Superior de Arquitectura en Madrid en 1929, después de dos años de estudios previos en la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Madrid en la calle de San Bernardo. De estos primeros [5] estudios Candela destaca el curso de Geometría Analítica impartido por D. Miguel Vegas Puebla-Collado, cuya formación le allanaría el camino posteriormente para el estudio de las láminas. Resaltemos la coincidencia de que D. Miguel Vegas fue discípulo de D. Eduardo Torroja y Caballé, renovador de la matemática española con aportaciones importantes a la geometría, y a su vez padre de D. Eduardo Torroja Miret, insigne Ingeniero de Caminos y creador de numerosas estructuras laminares de enorme mérito, que por su parte profesó un sincero aprecio y amistad por Miguel Vegas. El círculo se cierra ya que fueron precisamente las estructuras de Torroja, y en concreto el frontón Recoletos, la primera atracción de Candela hacia las formas laminares.

En su tercer curso en la Escuela estudia el primer año de Resistencia de Materiales, que en palabras de Candela [5] consistía en un "curso estupendo de Teoría de la Elasticidad". Este curso estaba dictado por el catedrático D. Luis Vegas Pérez, hijo del catedrático de Geometría Analítica D. Miguel Vegas, y que tuvo una influencia clave en la formación estructural de los Arquitectos de Madrid, que perduró al menos hasta finales de los años 70. Hay que recordar que, aunque las bases de la Teoría de la Elasticidad fueron desarrolladas en el siglo XIX por A. Cauchy y otros, el empleo de la Teoría de Tensores en este ámbito era muy novedoso. En efecto, el cálculo tensorial fue introducido por el matemático T. Levi-Civita en 1900 y sólo se popularizó en el ámbito de la física teórica en 1916 con la Teoría General de la Relatividad de A. Einstein. Aunque su utilización en la mecánica de medios continuos en un espacio euclídeo no resulta estrictamente necesaria, sí supone un avance claro y una ayuda a la interpretación independiente de los sistemas de coordenadas para las tensiones y deformaciones en el medio deformable y sus relaciones elásticas o de otro tipo.

El propio Félix Candela editó un libro con los apuntes del curso de Resistencia de Materiales de Luis Vegas. También lo hizo el entonces alumno Antonio García de Arangoá, cuyos libros de apuntes [6, 7] perviven en la biblioteca de la Escuela Superior de Arquitectura y son un ejemplo de claridad de ideas, rigor en el desarrollo y belleza en la exposición de la Teoría de la Elasticidad, de la Resistencia de Materiales y de sus aplicaciones en la Mecánica Estructural (F. 1). Estos textos incluyen un desarrollo conciso y riguroso de los conceptos, aplicaciones desarrolladas con precisión y la explicación de los conceptos de energía elástica y los teoremas consiguientes de Castigliano, Betti y Maxwell. Precisamente fue García de Arangoá quien sucedió al malogrado Luis Vegas después de la Guerra Civil española en la cátedra de Resistencia de Materiales, publicando un texto [8] que hereda el cuerpo teórico instituido en la Escuela para la elasticidad y las estructuras y que ha servido de libro de texto hasta los años 70.

De la exposición anterior deseo destacar el rigor y profundidad en la formación matemática y técnica que poseían los arquitectos en Madrid, lo que ciertamente les caracteriza y les dota de una capacidad especial no sólo para el entendimiento completo de la geometría y de los fenómenos resistentes de las estructuras, sino que muy especialmente les confiere un potencial de generación de ideas para el diseño, una "intuición educada" para las propuestas formales. Esta capacidad es la que en ocasiones diferencia una propuesta arquitectónica fundada sobre un boceto cuya base sea únicamente el atractivo estético del dibujo, de una propuesta cuya forma responda a una eficacia funcional y resistente, basándose en esto el mérito de su expresividad. Es a este último grupo de arquitectos al que pertenece Candela, sin duda en gran medida gracias a su formación en la Escuela de Madrid [5].

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 2)

Nombramiento de Félix Candela Doctor Honoris Causa de la Universidad Politécnica de Madrid, 1994

Es interesante citar asimismo las palabras de Candela en relación a la eterna discusión entre contenidos prácticos de la formación y la base teórica y científica, que son de absoluta actualidad en el contexto de modificación de los planes de estudios en la reforma de Bolonia [5]: "... si no hay más remedio que seleccionar lo que razonablemente se puede enseñar en tan poco tiempo, yo me inclinaría por eliminar o aligerar los estudios prácticos o puramente profesionales, dando preferencia a las materias teóricas aunque no parezcan tener una relación muy directa con la práctica del oficio. Difícilmente podrá iniciarse su estudio en épocas más tardías, mientras que el oficio se aprenderá necesariamente después, en la obra o en el taller profesional, y será en ese momento cuando tengamos que estar preparados para especializarnos y para profundizar en aquellos temas que se nos antojen necesarios para completar nuestro desarrollo como profesionales y como seres humanos".

La defensa del formalismo

La obra de Candela estuvo centrada en el estudio, análisis, proyecto arquitectónico, cálculo estructural y construcción de las cubiertas laminares. Como conoce cualquier ingeniero estructural las láminas rinden su eficacia debido a la propia geometría, a su forma. Este hecho llevó a Candela a publicar en 1985 una selección de sus textos alrededor de esta reivindicación, la "defensa del formalismo" [14].

La definición de formalismo la realiza de forma concreta como [15] "... la investigación científica de la configuración espacial, sin dejar de incluir el análisis detallado de la estructura interna". En este mismo escrito establece rotundamente su relación con la mecánica estructural: "La forma no puede ser arbitraria, sino que ha de satisfacer una serie innumerable de requisitos... De entre todos estos requisitos, quiero destacar los dos que considero más importantes en la elaboración de la forma arquitectónica: el factor estético y el factor estructural".

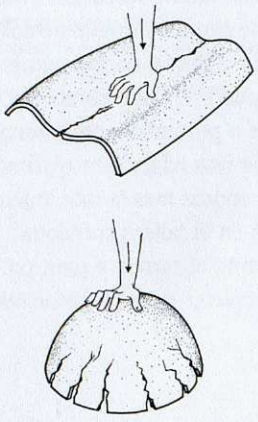
La reivindicación de la forma cobra especial importancia en las estructuras de hormigón, donde Candela es rotundo [16]: "Nos vemos obligados, aquí, a hacer una afirmación de apariencia un tanto brutal, pero que conviene decir de una vez por todas. El concreto armado no está hecho para trabajar a flexión en secciones de gran masa; concretamente en secciones rectangulares, a pesar de ser esta la manera habitual de utilizarlo... Aproximadamente dos tercios de la sección pétrea se convierten en un peso muerto que no efectúa ninguna función resistente, pero que *sí* contribuye a aumentar la sección que es necesario dar a la propia viga –o losa, que para el caso es lo mismo, y por supuesto de los elementos que la soportan– columnas y cimentación". La consecuencia para Candela resulta obvia [9]: "Queda así enunciado un principio económico fundamental: hay que evitar, en lo posible, los esfuerzos de flexión, mediante la elección de la forma apropiada. (...) Dicho de otro modo: la función estructural depende esencialmente de la forma...".

"¡Cuántas veces no he dado gracias a la enseñanza profundamente teórica que se me impartió en la vieja Escuela de Madrid! Lo que la mayor parte de mis compañeros consideraba absurdo e ininteligible, las abstractas teorías sobre la distribución de esfuerzos y deformaciones en el entorno de un punto situado en el interior de un cuerpo elástico sometido a ciertas cargas, tenían para mí una indiscutible belleza... llenaban de poesía científica las arideces de una técnica cuyo objetivo final era la prosaica determinación de la sección necesaria en una pieza estructural. Es cierto que, para la estricta satisfacción de esta necesidad, basta con aprenderse unas cuantas recetas, pero el tiempo empleado en estudiar la Teoría de la Elasticidad me ha rendido frutos inapreciables en el ejercicio ulterior de la profesión que elegí y me situó en condiciones ventajosas con relación a otros que tuvieron un aprendizaje más concreto y práctico"

Estos principios llevan a Candela a denunciar sin ambages la degradación del diseño arquitectónico, denunciando con crudeza escándalos como el de la Ópera de Sidney [17]: "Los arquitectos, hombres al fin, no pueden escapar de este clima surrealista en el que cualquier desaforado gesto puede producir mundial, aunque generalmente efímera, notoriedad. ¿Para qué descender a tan prosaicos detalles como el de asegurarse que una estructura tiene posibilidades de ser construida? Quédese esta tarea para ayudantes de segunda categoría, sin que haya peligro de que tales consideraciones limiten la capacidad creativa del genio. La Ópera de Sidney constituye un trágico ejemplo de las catastróficas consecuencias que esta actitud de desprecio por las más obvias leyes físicas puede acarrear".

A pesar del profundo conocimiento de Candela sobre el cálculo estructural, o precisamente por ello, formuló muy claramente importantes críticas a la obsesión por el análisis y a la no consideración de las limitaciones de la elasticidad [18]: "La consecuencia inmediata de las consideraciones anteriores es que los métodos basados en la Teoría de la Elasticidad no son apropiados para el análisis de estructuras hiperestáticas de concreto armado, y como estos métodos son los únicos admitidos por la mayoría de los Reglamentos, nos encontramos con el hecho insólito de que no podemos aplicar, para el cálculo de estructuras de concreto armado –casi el único material estructural– métodos que estén de acuerdo con sus características. Se ha llegado a la aberración de crear artificialmente –y, en muchos casos, con enormes dificultades de ejecución– condiciones de isostatismo, mediante articulaciones de las estructuras, con evidente menoscabo de la estabilidad definitiva de las mismas, y sin otra justificación constructiva que la de facilitar el planteamiento analítico del problema".

FUNDACIÓN MANELO TURRIANO



(F. 3)

Efecto de la doble curvatura en las láminas que impide el desarrollo de esfuerzos de flexión [9]

No quiere decir esto que se deba despreciar el cálculo, que en paralelo a los factores estéticos, deben contribuir a la creación de la forma arquitectónica [15]: "Lo mismo pasa con el factor estructural. Los ensayos de racionalizarlo, pretendiendo que los cálculos estructurales sean capaces de darnos la forma de una estructura, olvidan también las limitaciones y la misión de la técnica analítica. Esta puede únicamente operar desmenuzando una forma y unas dimensiones previamente determinadas".

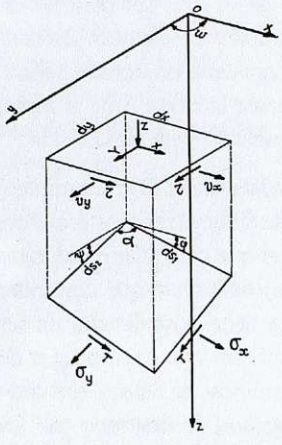
Estudio técnico de algunas láminas de Candela

Los modelos de Candela para el cálculo estructural de paraboloides hiperbólicos

Como ha quedado patente, Candela era un buen conocedor de las teorías de la mecánica estructural, y en particular de las láminas. En éstas el principio que les confiere mayor eficacia mecánica es el funcionamiento mediante esfuerzos de membrana, admitiéndose que debido a la forma y otros condicionantes se pueden despreciar los efectos de flexión [9].

Candela realizó su aportación personal al cálculo y diseño de las láminas de hormigón con forma de paraboloide hiperbólico en una serie de artículos [10, 11, 12]. De éstos debe destacarse que se basan exclusivamente en las ecuaciones de equilibrio y en las condiciones de borde, sin que el comportamiento del material ni la elasticidad jueguen ningún papel, lo que resulta coherente con las ideas de Candela antes expuestas. Además de su rigor y completitud formal, incluyen un sentido práctico de la formulación y sobre todo un enfoque dirigido a la comprensión del funcionamiento estructural y formal, más que a los pormenores del cálculo, también incluidos.

La formulación empleada por Candela de las ecuaciones de membrana en coordenadas cartesianas sigue en lo principal la Teoría de Pucher de 1937 [13]. Más allá de las ecuaciones diferenciales del equilibrio, Candela pone especial énfasis en la importancia de las condiciones de contorno para su integración. Estudia los casos básicos fundamentales, especialmente el caso de peso propio en distintas orientaciones, y resalta que en general, para que sea posible el funcionamiento de membrana, es imprescindible la colocación de elementos que en los bordes libres sean capaces de imponer las tensiones tangenciales y normales necesarias, ya que de otra forma se introducirán al menos localmente flexiones no deseadas. En los paraboloides con borde curvo, por el contrario, es posible en ocasiones mantener el funcionamiento de membrana con borde libre [11].



(F. 4)

Fuerzas y tensiones actuantes en un elemento de superficie [11]

Modelo de Elementos Finitos y factor de membrana

En lo que sigue se estudian mediante modelos de elementos finitos algunas cubiertas laminares de Candela con forma de paraboloide hiperbólico. El objeto aquí no ha sido tanto calcular las tensiones o el factor de seguridad de la cubierta, sino de ayudar a interpretar cualitativamente el funcionamiento de la lámina. En concreto se muestran en las siguientes figuras los mapas de un índice que proponemos para evaluar el comportamiento de membrana. También se muestran los mapas de tensiones principales de compresión y de tracción para entender el flujo de esfuerzos en las láminas.

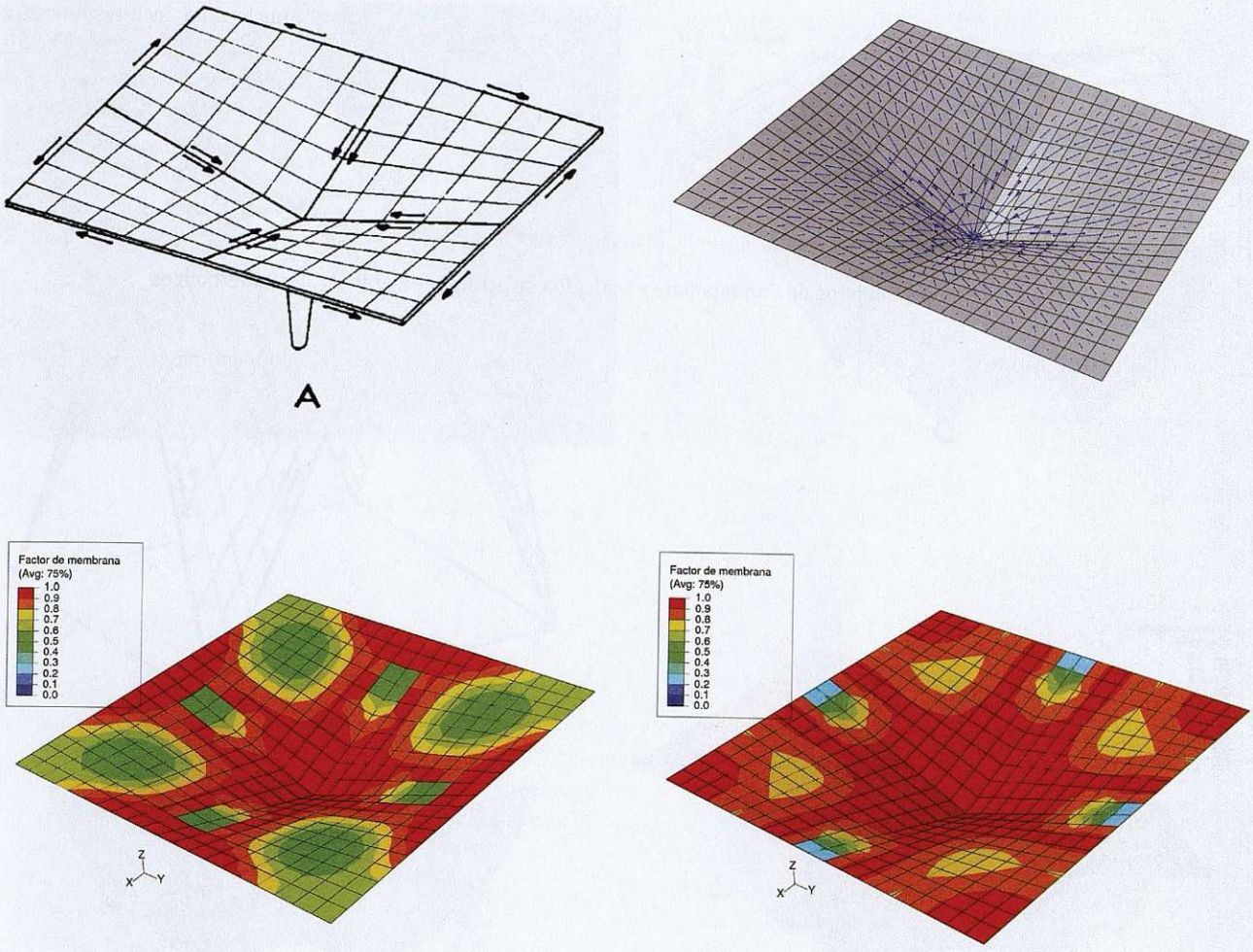
Los cálculos se han realizado mediante el programa de elementos finitos ABAQUS [19] empleando elementos lámina cuadriláteros SR4, que incluyen deformación por cortante y disponen de una técnica especial de integración reducida para evitar el bloqueo en láminas delgadas como las que nos ocupan. Se trata de cálculos estáticos, suponiendo comportamiento elástico lineal y pequeñas deformaciones. Todas las láminas tienen un espesor de 4cm, con propiedades elásticas del hormigón E = 30Gpa, v = 0,2, densidad 2.500kg/m^3, y están sometidas a su peso propio multiplicado por dos.

Para evaluar de manera sencilla el comportamiento de membrana o de flexión de la lámina, se propone un índice (escalar) cuyo valor en cada punto está entre cero (flexión pura) y uno (membrana pura). Representa la fracción de la densidad de energía elástica total que corresponde a los esfuerzos de membrana:

$$W_{memb} = \frac{1}{2}\ (N_1E_1,\ N_2E_2,\ 2N_3E_3);\ W_{flex} = \frac{1}{2}\ (SM_1SK_1 + SM_2SK_2);$$

$$F_{memb} = \frac{W_{memb}}{W_{memb} + W_{flex}},\ 0 \leqslant F_{memb} \leq 1$$

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 5)

Cubierta tipo "A" formada por cuatro paraboloides hiperbólicos. En la fila superior, esfuerzos en los bordes libres en el análisis de Candela [10], y resultados de tensiones principales de compresión. En la inferior, índices de membrana con borde libre (izquierda) y con borde restringido en dirección tangencial (derecha)

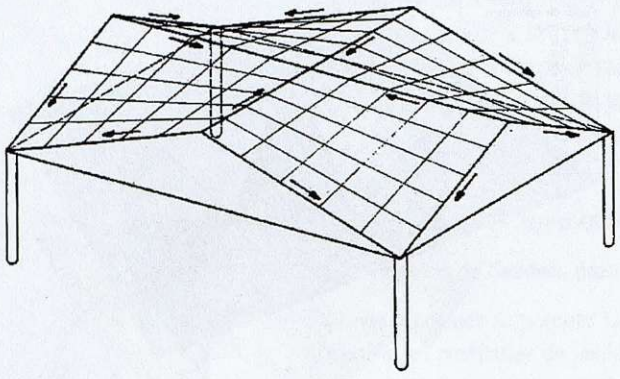
donde (N_1, N_2, N_3) son los esfuerzos (axiles, cortante) de membrana, (E_1, E_2, E_3) las deformaciones asociadas, (SM_1, SM_2) los momentos flectores y (SK_1, SK_2) sus curvaturas asociadas, estando todos ellos expresados por unidad de longitud de la lámina. No se considera el torsor en la lámina.

Paraboloides hiperbólicos básicos

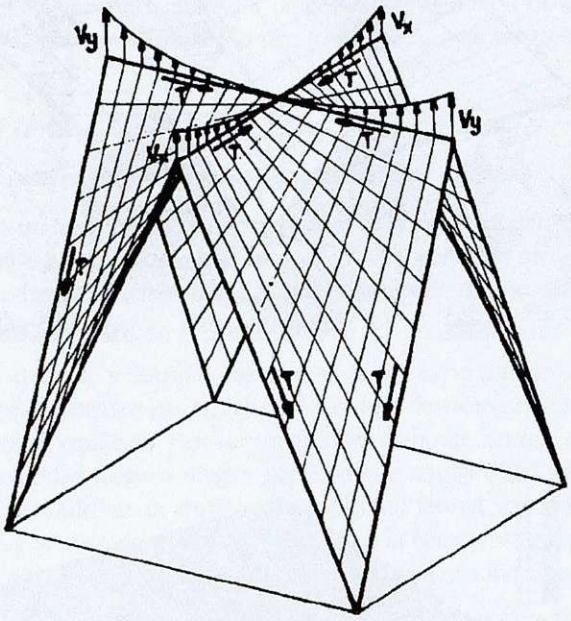
Consideramos en primer lugar el clásico "paraguas" empleado profusamente por Candela, formado por cuatro cuadriláteros alabeados, cada uno de los cuales es un paraboloide hiperbólico. Es el caso denominado "A" por Candela [10]. En este análisis se plantean las ecuaciones diferenciales de equilibrio y se resuelven en función de las condiciones de contorno. Como ya se ha dicho, Candela remarca la importancia de dichas condiciones y, en concreto para este paraguas, determina (F. 5) que no puede existir un estado de membrana con el borde libre, ya que hay unas tensiones tangenciales no equilibradas.

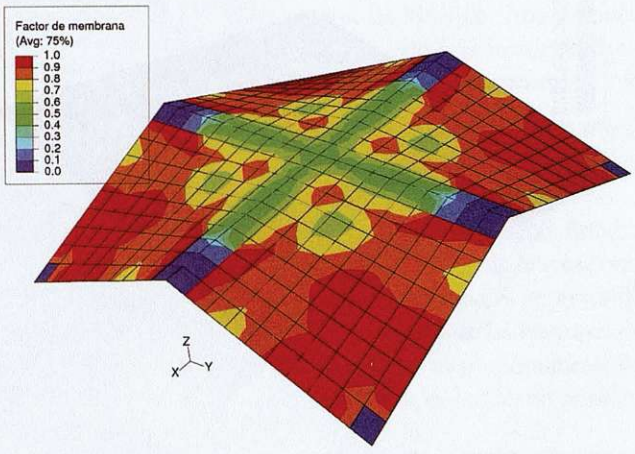
El caso estudiado tiene unas dimensiones en planta de 8m x 8m y una profundidad de 1,6m. En la (F. 5) se muestra el mapa del índice de membrana en dos hipótesis, dejando el borde libre así como restringiendo el movimiento longitudinal en dicho borde, de forma que se transmitan las tensiones tangenciales que pida la lámina. Se comprueba que de esta manera el comportamiento de la lámina es considerablemente mejor, con índices de membrana más elevados, mejorando especialmente en los bordes y las esquinas libres. Los puntos con máxima componente de flexión son los bordes internos con forma de V, los cuales Candela efectivamente señala que deberían reforzarse como vigas de borde y armarse de manera adicional.

FUNDACIÓN JANELO TURRIANO



D





(F. 6)

Cubierta tipo "D" formada por cuatro paraboloides hiperbólicos. Arriba, esquema de esfuerzos de Candela [10], y descripción de los esfuerzos no equilibrados en los bordes libres y en las cumbreras [11]. Abajo, índice de membrana. De acuerdo con el análisis de Candela, en las cumbreras con esfuerzos no equilibrados se genera una flexión no deseada, siendo mínimo aquí el índice de membrana

Se analiza a continuación la configuración "D" de paraboloides hiperbólicos de Candela [10]. Se trata de una cubierta con cumbreras horizontales también formada por 4 paraboloides, con las mismas dimensiones que el caso anterior (8m x 8m y profundidad de 4m) (F. 6). En el análisis desarrollado [11] Candela resalta la importancia de las condiciones de borde y en particular los esfuerzos no equilibrados que aparecen en las cumbreras, por lo que o bien introducirían un comportamiento indeseado de flexión o sería necesario reforzarlas con elementos de borde que transmitieran las reacciones necesarias a la lámina. El análisis realizado por elementos finitos confirma este comportamiento, mostrándose el índice de membrana claramente degradado en estas zonas y en menor medida en los bordes libres con tensiones tangenciales sin equilibrar, siendo mínimo en el extremo de las cumbreras donde son mayores los esfuerzos verticales no equilibrados.

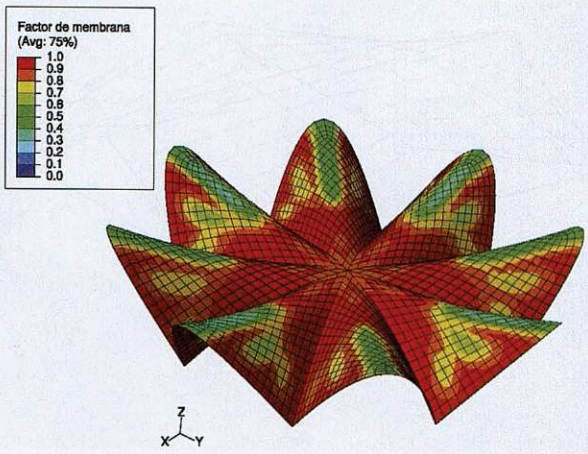
Restaurante Los Manantiales en Xochimilco

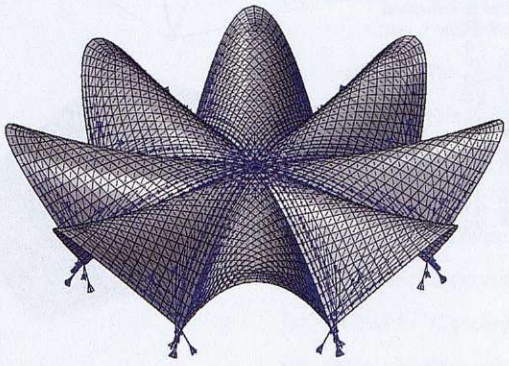
Hemos aplicado el mismo tipo de análisis a una de las obras maestras de Candela, el restaurante Los Manantiales en Xochimilco, México. Se trata de cuatro paraboloides hiperbólicos con bordes curvos, en los que Candela ya había estudiado y experimentado que los efectos no equilibrados en estos bordes tienen menor importancia que en los de borde recto, pudiéndose obtener formas espectaculares al no precisarse vigas de borde.

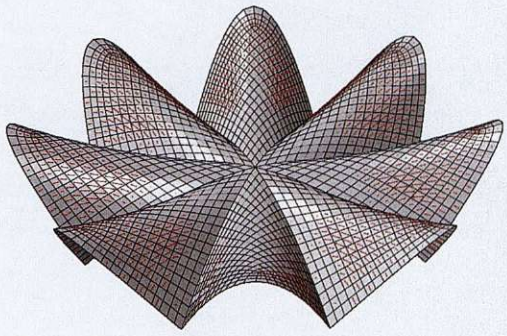
Los datos geométricos para el modelo (F. 7) se han tomado del libro de Faber [2]. Los apoyos de las láminas son puntuales, zunchados mediante unas barras de acero en la cimentación, formando un octógono con un diámetro de su circunferencia inscrita de 30m, y una altura del punto central de 5,84m. Es de destacar que una copia de esta cubierta es la obra póstuma de

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO









(F. 7)

Cubierta del restaurante Los Manantiales en Xochimilco.
En la fila superior fotografía de la obra y mapa del índice de membrana. En la fila inferior, mapa de tensiones principales de compresión y tracción

Candela, el restaurante del Oceanogràfic en Valencia, España, terminado en 2002 por Santiago Calatrava, con el cual colaboró, después del fallecimiento de Candela en 1997.

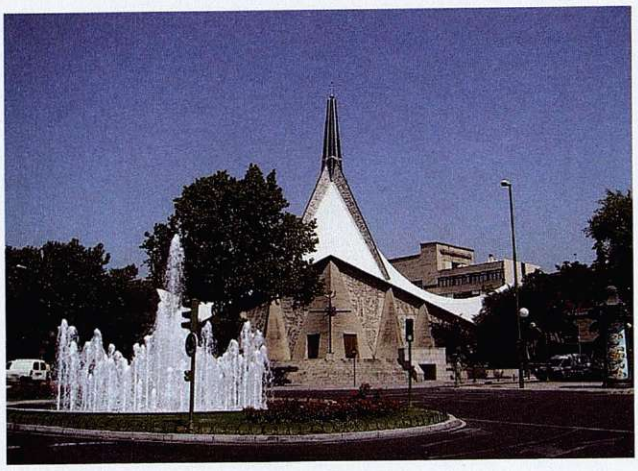
Del análisis realizado con elementos finitos (F. 7) se observa que, sin necesidad de ningún tratamiento especial en los bordes libres, se desarrolla un comportamiento de membrana bastante satisfactorio. En los bordes de intersección inferiores en V se han regruesado las filas de elementos adyacentes a 12cm con objeto de conformar un elemento más rígido que funcione como viga arco y recoja las cargas de la lámina.

Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe en Madrid

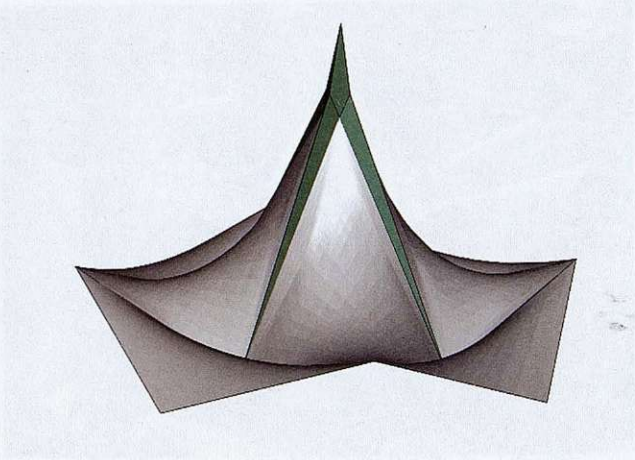
En el año 1963 se construye la denominada popularmente Iglesia de los Mexicanos en Madrid, con proyecto de Enrique de la Mora y cálculos estructurales de Félix Candela. Colabora asimismo en la obra Jose A. Torroja Cabanillas, que amablemente nos ha proporcionado acceso a los planos y documentos originales de cálculo del proyecto. La cubierta (F. 8) está formada por ocho paraboloides hiperbólicos, con un vértice central más elevado a semejanza de un sombrero mexicano. La base forma un octógono con círculo circunscrito de diámetro 53,74m. Los paraboloides centrales están unidos mediante unas cristaleras sujetas por elementos metálicos.

En la (F. 9) se muestra parte de uno de los cálculos de Candela en los que proporciona los valores de fuerzas necesarias en los apoyos del borde exterior, aspecto que ya se ha comentado antes que resulta esencial para garantizar el funcionamiento como membrana, y al que como vemos Candela dedica su atención preferente.

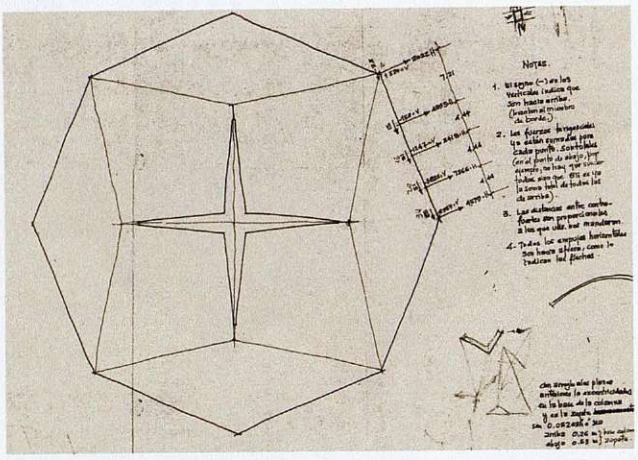
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



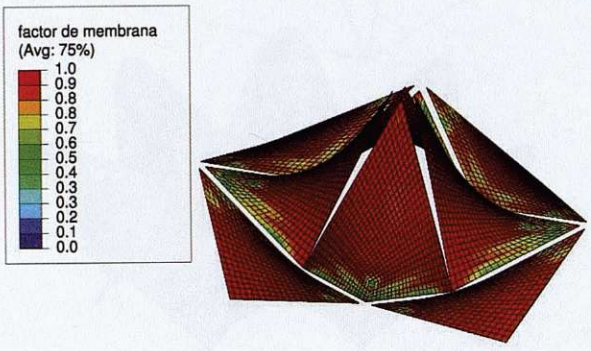
(F. 8)



(F. 9)



(F. 10)



(F. 11)

(F. 8, 9)

La iglesia de Nuestra Sra. de Guadalupe en Madrid, fotografía y modelo de la cubierta

(F. 10)

Cálculos de Candela para el proyecto de la iglesia de Nuestra Sra. de Guadalupe en Madrid, relacionados con las reacciones de borde (cortesía de J.A. Torroja)

(F. 11)

Factor de membrana de la iglesia de Nuestra Sra. de Guadalupe en Madrid. Se observa un comportamiento muy bueno en general, siendo más bajo en los bordes de intersección inferiores

En el modelo de elementos finitos los bordes exteriores se han considerado fijos de manera continua. Asimismo, las líneas de unión interiores entre los paraboloides centrales y los exteriores están regruesadas (a 12cm) para formar vigas en V que recojan la carga de las láminas. En la (F. 10) se muestra el mapa del índice de membrana, comprobándose su valor elevado en general con excepción de las zonas alrededor de las citadas líneas interiores en V.

Observaciones finales

Como colofón me sumo a las certeras palabras del Prof. D. Ricardo Aroca en 1994 [5], concluyendo que Candela es "... un genio real, no producto del despilfarro y de la moda, sino de la sencillez y de la economía, un constante cultivador del sentido común, un creador sin alardes y con un juicio certero sobre lo útil y lo posible". Lo expuesto en este trabajo espero que sirva por una parte para reivindicar la formación científica y rigurosa como la base principal de un creador, en tanto que le permite una intuición educada, capaz de dominar los modelos matemáticos y emplearlos en sus justos términos conociendo sus limitaciones. Por último, los cálculos mediante modelos avanzados de elementos finitos nos permiten estudiar con detalle las hipótesis de funcionamiento estructural y corroborar –de forma innecesaria ya que la realidad de sus construcciones es la mejor prueba– la base técnica del formalismo de Candela.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Referencias

[1] Candela F.: Encuesta en la revista *Espacios*, México, 1955.

[2] Faber C.: *Candela: The Shell Builder*, Reinhold, Nueva York, 1963.

[3] Garlock M., Billington D.P.: *Félix Candela. Engineer, Builder, Structural Artist*, Yale University Press, New Haven CT, 2008.

[4] Candela F.: *Arquitectura y estructuralismo*, Ponencia en el Congreso de la Unión Internacional de Arquitectos, México, 1963.

[5] Universidad Politécnica de Madrid, *Acto de investidura como Dr. Honoris Causa de D. Félix Candela Outeriño*, 10 de mayo de 1994.

[6] Vegas Pérez L.: *Apuntes de Resistencia de Materiales*, tomados por D. Antonio García de Arangoá, Escuela Superior de Arquitectura de Madrid, 1931.

[7] Vegas Pérez L.: *Apuntes de Hormigón Armado*, tomados por D. Antonio García de Arangoá, Escuela Superior de Arquitectura de Madrid, 1932.

[8] García de Arangoá A.: *Elasticidad Teórica*, Escuela Superior de Arquitectura, 1944.

[9] Candela F.: "Estereoestructuras", *Espacios* N. 17, México, 1953.

[10] Candela F.: "Structural Applications of Hyperbolic Paroboloidical Shells", *aci Journal, Proceedings*, Vol. 51, enero 1955.

[11] Candela F.: "General Formulas for Membrane Stresses in Hyperbolic Paroboloidical Shells", *aci Journal, Proceedings*, Vol. 57, oct. 1960.

[12] Candela F.: "The hyperbolic paraboloid", en Faber C.: *Candela: The Shell Builder*, Reinhold, Nueva York, 1963.

[13] Pucher, A.: "Die berechnung von doppelt gekrummten schalen mittels Diferenzer gleichungen", *Der Bauingenieur*, Vol. 18, Nos. 9-10, Berlín, 1937.

[14] Candela F.: *En defensa del formalismo y otros escritos*, Xarait ediciones, Bilbao, 1985.

[15] Candela F.: *Dos nuevas iglesias en México*, Conferencia en la Casa del Arquitecto, México, abril 1956.

[16] Candela F.: "Divagaciones estructurales en torno al estilo", *Espacios*, México, 1953.

[17] Candela F.: "El escándalo de la ópera de Sidney", *Arquitectura*, Madrid, 1968.

[18] Candela F.: *Hacia una nueva filosofía de las estructuras*, Student Publications of the School of Design, North Carolina State College, Raleigh nc, 1955.

[19] Simulia inc., abaqus v6.8 Finite Element Analysis Program, *www.abaqus.com*, 2008.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Félix Candela y Eladio Dieste, dos maestros

Gonzalo Larrambebere

Ingeniero Civil. Director de Dieste y Montañez S.A., Montevideo
Profesor de la Facultad de Ingeniería. Construcción y Tecnología del Hormigón
Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

Al ver el conjunto de obras de Félix Candela y Eladio Dieste, se siente que ambos pertenecen a un mismo género de innovadores geniales. Candela es arquitecto y Dieste ingeniero civil. Sin embargo, parece que ambos escapan al simple nombre de las dos profesiones. Es curioso que a Candela lo destaquen como ingeniero proyectista y a Dieste lo premien como arquitecto. Es que los dos trascienden a las funciones habituales de las dos disciplinas y es difícil encuadrarlos en una sola denominación. Quizás, el término *structural artist*, empleado por David Billington y María Garlock, es el que mejor describe la principal característica de ambos.

A partir de un profundo dominio de las ciencias básicas y una apasionada búsqueda de armonía, belleza y economía, los dos arriban a la construcción de grandes superficies delgadas, de "cáscaras", que son admiradas en el mundo de la arquitectura, de la ingeniería y del arte.

Tuve la suerte de trabajar y aprender con Dieste desde 1976. Cuando, mucho después, conocí las obras de Candela, vi que tenían muchas analogías y algunas divergencias. En lo que sigue me refiero, en paralelo, a algunos aspectos de la notable obra de estos dos creadores, que continúa siendo ejemplo y enseñanza. Por eso los llamo maestros y hago mis comentarios en tiempo presente.

Geometría de las cáscaras

La mayor parte de las cáscaras de Candela son paraboloides hiperbólicos de variadas relaciones entre sus dimensiones, con bordes rectos o curvos, simétricos o asimétricos, horizontales o inclinados, aislados o dispuestos en conjunto.

Candela elige los paraboloides porque son superficies regladas que tienen virtudes estructurales y constructivas. Las superficies regladas son aquéllas que pueden generarse mediante el movimiento de una recta (generatriz), que se desplaza según una determinada ley, apoyándose en dos curvas no coplanares (directrices). Por ese motivo las superficies regladas son más fáciles de replantear en el espacio, con lo que se simplifica el montaje del encofrado. Las directrices de los paraboloides son rectas no coplanares. Con un conjunto de cuatro paraboloides contiguos, que comparten, en parejas, una directriz común y descargan en un pilar central, Candela forma su famoso "paraguas".

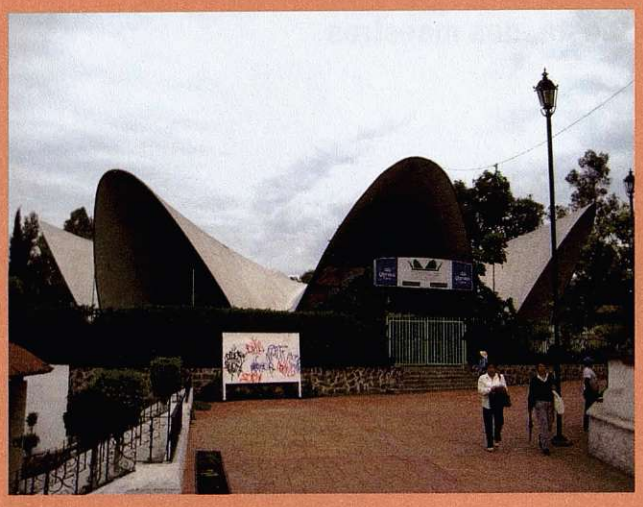
Variando el ángulo de las directrices, Candela realiza paraboloides de pequeña flecha ("rebajados"), como los de sus primeras cáscaras experimentales, o estructuras majestuosamente peraltadas, como la capilla en Lomas de Cuernavaca o la de San Vicente de Paúl.

Las bóvedas de Dieste son de directriz catenaria, de simple o doble curvatura, apoyadas en vigas de borde de hormigón o autoportantes, que descargan directamente en los pilares. Las bóvedas de doble curvatura pueden ser continuas o discontinuas. Con los arcos anticatenarios, que son las curvas funiculares de su peso propio, Dieste explota al máximo la capacidad del ladrillo cerámico de resistir las tensiones de compresión.

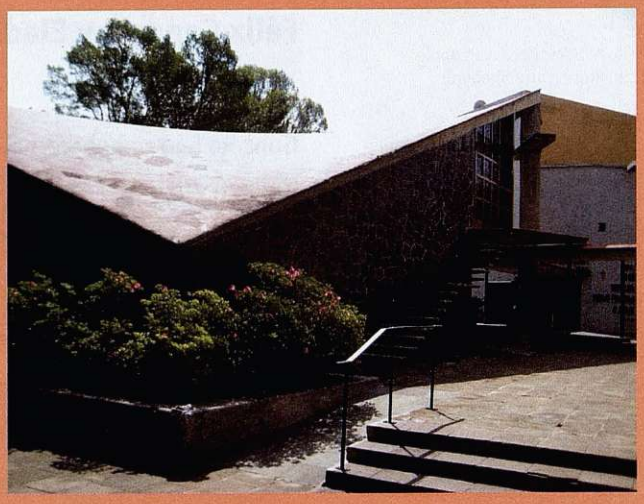
Otra tipología utilizada por Dieste es la de las superficies regladas con generatrices que forman ángulos entre 70 y 90 grados aproximadamente con el plano horizontal. Ejemplos de esta geo-

Salvo las indicadas, todas las fotografías pertenecen al Archivo Dieste.

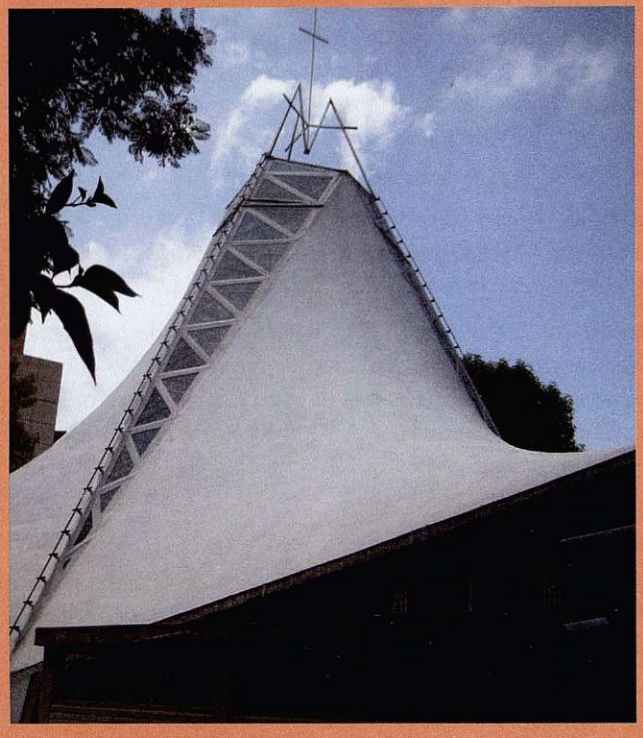
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



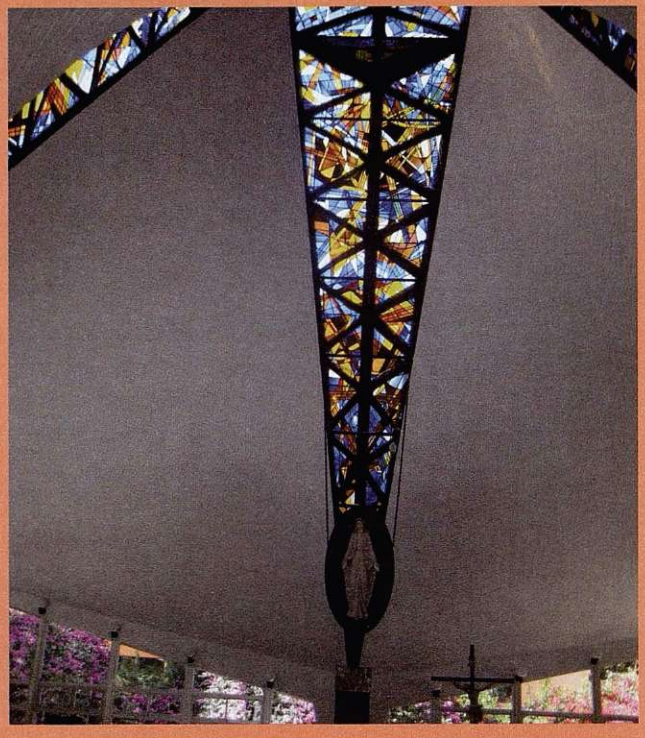
(F. 1)



(F. 2)



(F. 3)



(F. 4)

(F. 1)

Restaurante Los Manantiales

(F. 2)

Capilla Nuestra Sra. de la Soledad

(F. 3, 4)

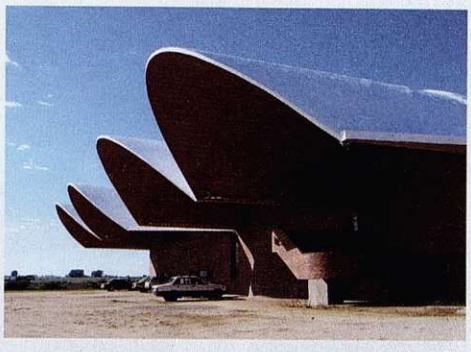
Capilla de San Vicente de Paúl, exterior e interior

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 5)
Silo A. Soler Roca, con doble curvatura (Larrambebere)

(F. 6)
Embotelladora Fagar, autoportante

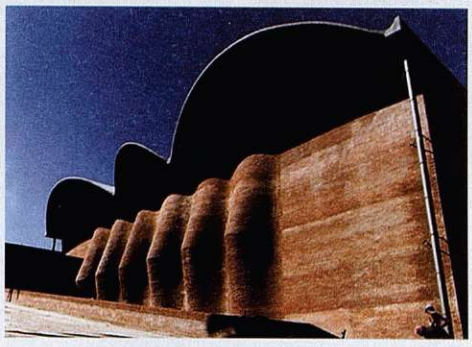




(F. 7)
Iglesia de Atlántida

(F. 8)
Montevideo Shopping Center

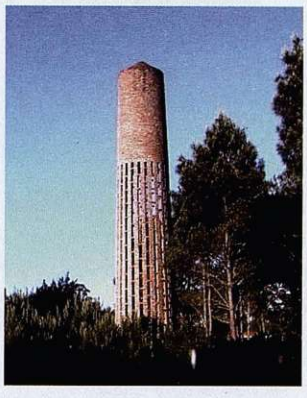




(F. 9)
Tanque de agua Las Vegas

(F. 10)
Tanque de agua Salto

(F. 11)
Antena de televisión







metría se ven en las paredes portantes onduladas de la Iglesia de Atlántida, en el Montevideo Shopping Center o en los muros testeros de los silos horizontales de Fosfato Thomas.

Los tanques de agua elevados, las torres de antenas o de campanarios son superficies regladas de revolución. En algunos casos los fustes de los tanques son calados para aligerar la visual y destacar la cuba superior. Las formas de estas torres son cilíndricas o, más comúnmente, tronco-cónicas. A veces, la estructura está compuesta por dos troncos de cono opuestos.

Dieste utiliza las superficies plegadas con menos frecuencia, pero hay que mencionar la genial reconstrucción de la Iglesia de San Pedro de Durazno, que se había incendiado en 1966. Dieste mantiene la fachada original, que no fue afectada por el fuego, y proyecta la nueva nave interior con una estructura plegada de planos precomprimidos. En el pórtico de entrada diseña un rosetón, compuesto por cinco hexágonos irregulares concéntricos.

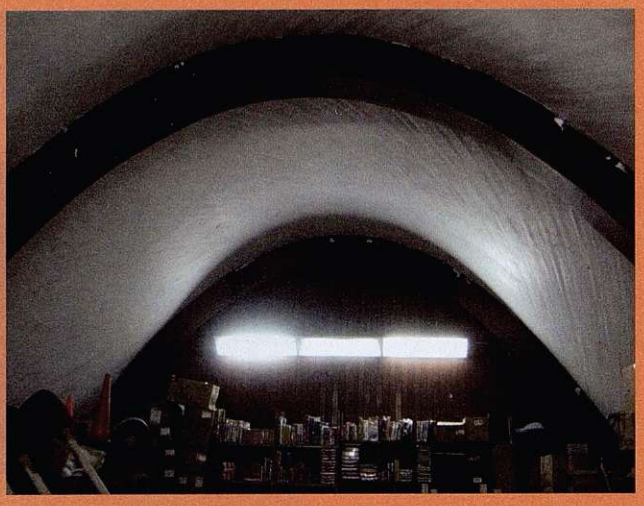
El material

Candela utiliza el hormigón para construir sus cáscaras delgadísimas. Es un hormigón con poca fluidez, pues debe ser colocado en superficies inclinadas. Cuando la inclinación es muy marcada el hormigón debe tener muy poca humedad. En estos casos, para mejorar el acabado de la superficie interior, se coloca una capa fina de mortero sobre el encofrado, inmediatamente antes del hormigonado. En general, las cáscaras de Candela llevan una malla de acero en su interior para absorber las solicitaciones de tracción y controlar la fisuración del hormigón. Las aristas de borde o de encuentro entre láminas adyacentes suelen tener un espesor mayor, por lo que se arman como vigas, con varillas de acero longitudinales y estribos.

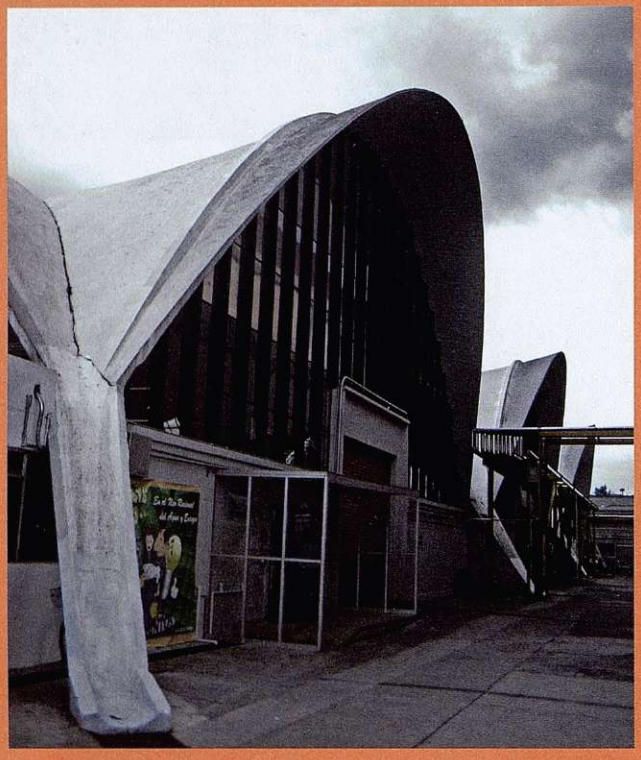
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



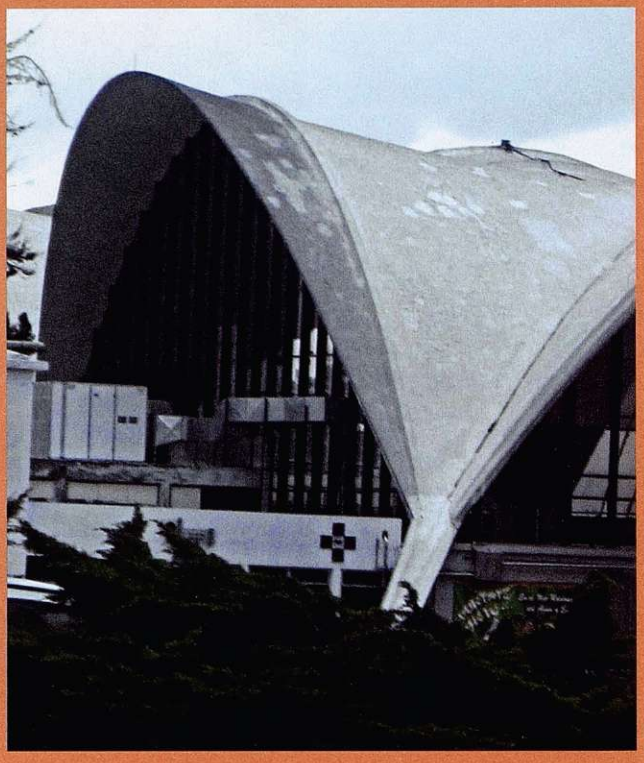
(F. 14)



(F. 15)



(F. 16)



(F. 17)

(F. 14)
Laboratorio de Rayos Cósmicos
(F. 15)
Bóveda del Laboratorio de Rayos Cósmicos vista desde el interior
(F. 16, 17)
Planta embotelladora Bacardí

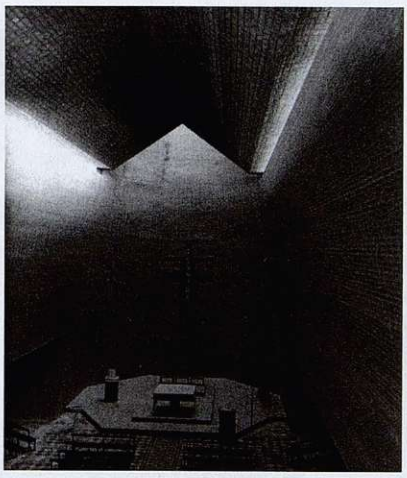
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

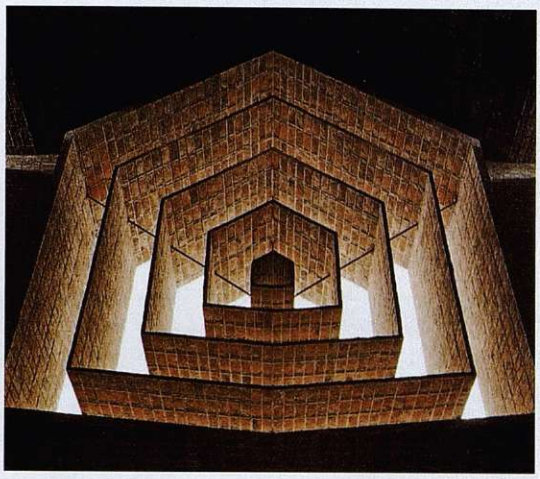
(F. 12)

Iglesia San Pedro de Durazno

(F. 13)

Rosetón de la Iglesia San Pedro de Durazno





Dieste usa el ladrillo armado para edificar sus bóvedas, le llama "cerámica armada". En el ladrillo encuentra un material resistente, durable, económico, aislante, manuable, apto para reproducir superficies espaciales y trasmisor de la elegancia y calidez de siglos de tradición constructiva. En Uruguay se fabrican industrialmente ladrillos macizos o huecos, como "bovedillas", "ticholos" (deformación de la palabra portuguesa *tijolo*) y el llamado "ladrillo de campo", producción artesanal, casi siempre familiar, que está disponible en todo el territorio a un precio muy accesible. Los ladrillos se unen con mortero de arena y cemento y se cubren exteriormente con una capa de mortero. Las armaduras se disponen en las juntas entre ladrillos y en la capa de mortero, que Dieste llama el "alisado".

Modelo estructural, espesores

Se pueden encontrar analogías y diferencias en la forma en que ambos maestros modelan sus estructuras. Está claro que ambos procuran proyectar estructuras básicamente membranales, cuyas solicitaciones principales sean las fuerzas directas, actuantes en el plano tangente a la cáscara.

En Candela el objetivo es absoluto, de ahí la extrema delgadez de sus láminas: 4cm y en algunos casos bastante menos: 1,5cm en sectores de la cubierta del Laboratorio de Rayos Cósmicos. El hormigón toma las compresiones y la malla de acero las tracciones. Las inevitables flexiones en algunas zonas de sus cáscaras, a las que el mundo académico de los 60 les dedicó atención, son solicitaciones secundarias en el proyecto de Candela. Las fuerzas resultantes son recogidas por nervios de mayor espesor, ubicados en las aristas entre cáscaras adyacentes, y dirigidas a las estructuras de sostén o son neutralizadas por tensores.

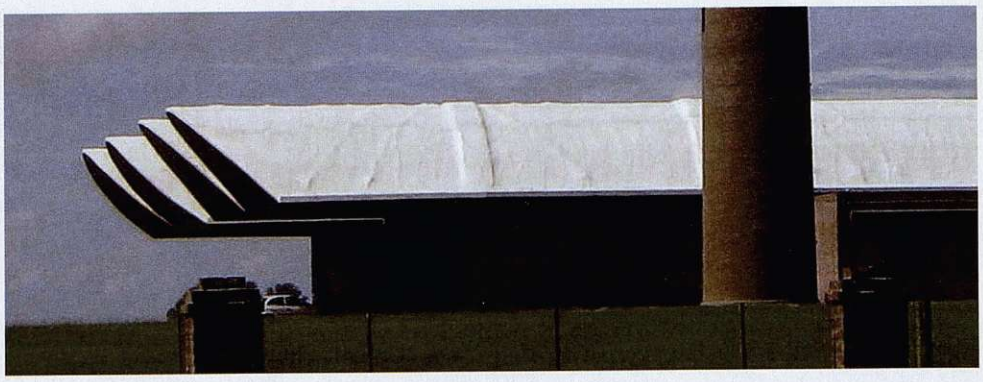
Las cáscaras de Dieste, ya por el hecho de ser construidas con ladrillos, son menos delgadas. Los espesores habituales oscilan entre 8 y 15cm. Las bóvedas catenarias que apoyan en vigas de borde están sometidas por el peso propio a un estado básico de compresión, al cual se le superponen efectos de viento, temperatura, cargas puntuales colgantes, cargas móviles, empujes de grano en el caso de los silos, etc. Las secciones de las bóvedas están, por tanto, presoflexadas, siendo preponderante la compresión en la mayoría de los casos. Un caso particular son las bóvedas autoportantes (*self-carrying vaults* las llama Stanford Anderson), que tienen un comportamiento análogo al de una viga en la dirección longitudinal. Cuando estas bóvedas autoportantes tienen grandes dimensiones, Dieste las precomprime para reducir las solicitaciones y las deformaciones.

Pandeo, arcos de rigidez

Las tensiones de compresión en casi toda la superficie de las cáscaras de Candela y Dieste son pequeñas, mucho menores que las tensiones admisibles de cualquier hormigón, mortero o ladrillo de mediana calidad. Pero las cáscaras de gran luz, al igual que un pilar delgado de gran altura, no arriostrado, pueden ser elásticamente inestables, es decir, pueden pandear. Los dos maestros nos dicen que las mejores estructuras son las que resisten por su forma. Consecuentemente, para evitar el pandeo en las bóvedas de gran luz, Dieste curva las secciones transver-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 18)
Planta embotelladora Fagar



sales, o sea, diseña las bóvedas con doble curvatura. De esta manera se aumenta la inercia de las secciones transversales, prácticamente sin incorporación de material, es decir, sin aumento del peso propio.

Un aspecto crítico del proyecto de las cáscaras es la forma en que éstas descargan sobre las estructuras de sostén. Las últimas suelen ser elementos lineales de mayor espesor, rectos o curvos, incorporados a la geometría de la cáscara, que van recogiendo las descargas de la superficie delgada y las trasmiten a los elementos puntuales (pilares o bases). En general son elementos curvos, llamados arcos de rigidez. En el contacto entre la cáscara y el arco de rigidez se produce una suerte de discontinuidad elástica en la cáscara por efecto del abrupto cambio de espesor. La deformabilidad de la cáscara es mayor que la del arco de rigidez, por lo que pueden aparecer fisuras en la zona de contacto. Curiosamente, dos plantas embotelladoras, Bacardí de Candela y Fagar de Dieste, presentan arcos de rigidez, que molestan visualmente a los dos maestros. Éstos buscan y encuentran la forma de eliminarlos o atenuarlos en otras obras. Un recurso (otra vez) es la forma. Por ejemplo, en la arista de encuentro entre dos láminas se produce naturalmente una línea de rigidez aunque el espesor sea constante. Es el caso de los encuentros de cada pareja de paraboloides de un paraguas de Candela, sobre la directriz común a ambos. O de la arista de encuentro entre dos bóvedas autoportantes contiguas de Dieste, cuya rigidez permite que la descarga a los pilares se haga sin la intermediación de una viga de borde.

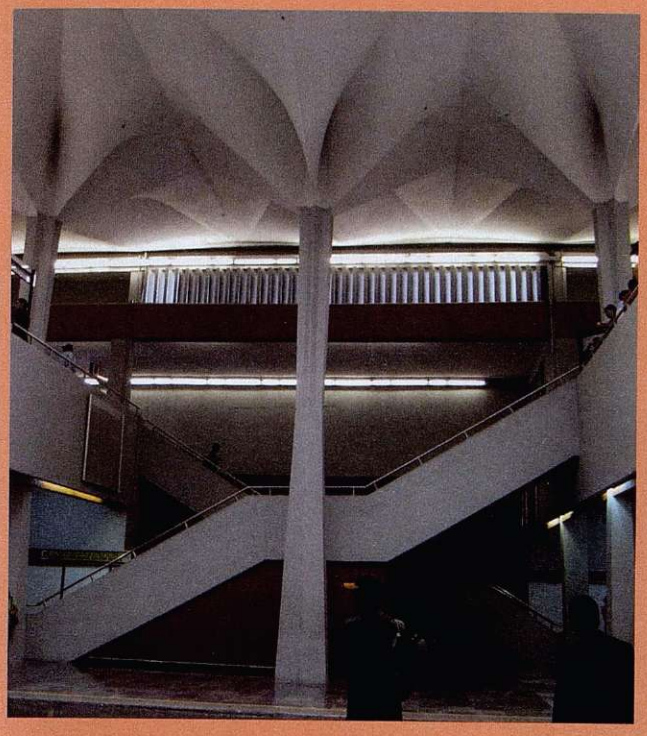
Otro recurso provendrá de la información suministrada por el cálculo de las cáscaras por elementos finitos, que confirmará en general las previsiones del cálculo analítico de los maestros y contribuirá a minimizar los espesores de las líneas de rigidez. (Recuerdo la emoción que sentí hace 17 años, al "correr" por primera vez un programa de elementos finitos con una bóveda autoportante y ver que los resultados gráficos confirmaban con notable justeza el estado tensional previsto por Dieste. Y no olvido la naturalidad con que él recibió la noticia).

Encofrados

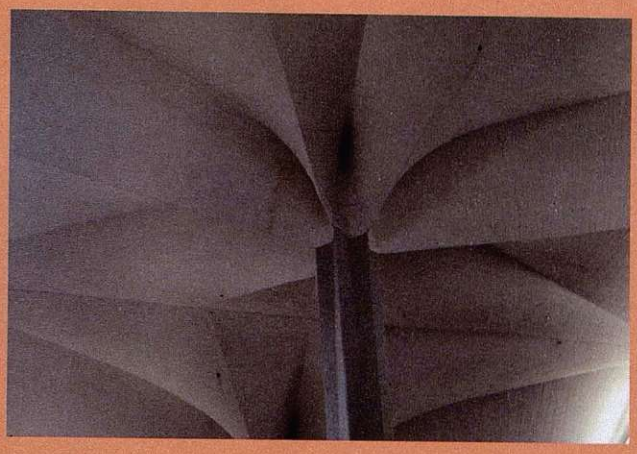
El proyecto de Candela es magistral, es global. En el diseño están implícitamente contemplados el proceso constructivo y la simplicidad del montaje del encofrado, que reproduce la compleja superficie espacial. Para replantear espacialmente los paraboloides basta ubicar las dos rectas directrices en el espacio y construir una estructura que las materialice (en general dos costillones rectos de madera). Luego, se unen los puntos correspondientes de las dos directrices con un haz de hilos cercanos, que constituyen las generatrices del paraboloide. En la posición de las generatrices se montan piezas rectas (costillas de madera) sobre las que se fijan las tablas del encofrado. Si es necesario reducir la luz libre de las costillas se pueden determinar directrices auxiliares intermedias, cortando las generatrices con planos verticales. Estas directrices auxiliares no son rectas, sino curvas fácilmente determinables en el espacio, en cuyas posiciones se materializan los costillones intermedios. Los conjuntos de varios paraguas iguales, como en el Mercado de Coyoacán, o de los paraboloides más sofisticados de las Estaciones del Metro se construyen con moldes reusables.

Dieste construye sus bóvedas en franjas, con encofrados móviles. Estos encofrados constan generalmente de una infraestructura metálica, donde se fijan las ruedas que desplazan el molde horizontalmente sobre rieles y los gatos electromecánicos que lo mueven en dirección vertical. Encima

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



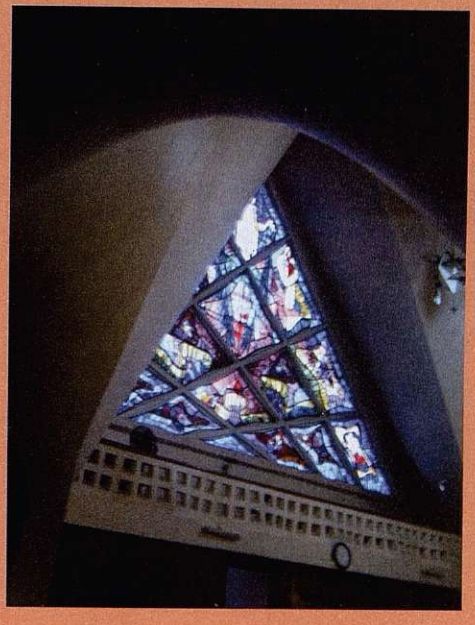
(F. 19)



(F. 20)



(F. 25)



(F. 26)

(F. 19, 20)
Estación de Metro
(F. 25)
Planta embotelladora Bacardí
(F. 26)
Iglesia de la Virgen Milagrosa

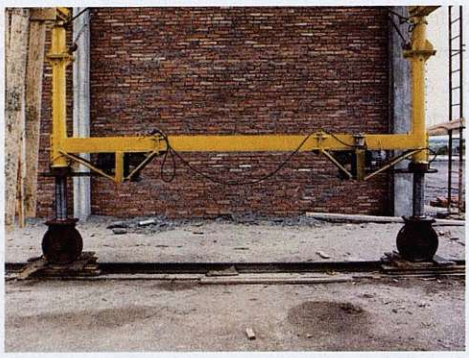
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 21)

Ruedas y gatos electromecánicos

(F. 22)

Costillas, doble curvatura





(F. 23)

Molde de un silo (Larrambebere)

(F. 24)

Forro de madera sobre las costillas (Larrambebere)





de la infraestructura metálica se dispone una superestructura de madera, formada por costillas próximas, sobre las cuales se clavan las tablas del encofrado. El uso repetido de los encofrados diluye su costo en toda la obra, al igual que en el caso de los paraguas múltiples de Candela.

Las paredes onduladas y las torres de Dieste se erigen sin encofrados. Para replantear estas superficies se ubican dos directrices, en general las extremas, que se unen con un sistema de hilos que generan una superficie auxiliar. Luego se construye la pared, colocando la mampostería tangente a la superficie que forman los hilos.

Desencofrado

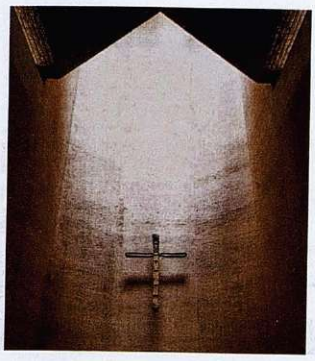
No tengo información acerca del tiempo necesario para el endurecimiento del hormigón de las cáscaras de Candela, previo al desencofrado. Ni de la resistencia exigida al hormigón para realizar dicha operación. Es claro que ese tiempo depende de factores como la dosificación del hormigón, la temperatura, la forma y las dimensiones de la estructura.

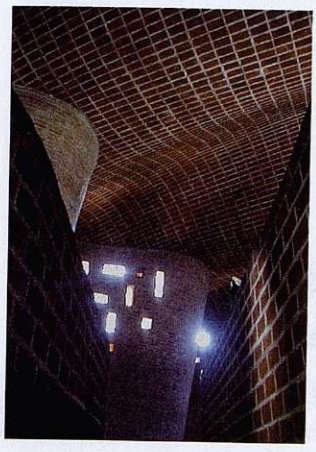
Dieste desencofra sus bóvedas catenarias al cabo de unas 14 horas en verano y algo más en invierno, salvo que se utilicen dispositivos calefactores que mantengan el proceso químico de fraguado y endurecimiento. El mortero de las juntas se encuentra parcialmente confinado por los mampuestos, lo que mejora su comportamiento resistente por un efecto similar al zunchado. Cuando las probetas de mortero ensayadas en una prensa diseñada por Dieste alcanzan los 5Mpa, se procede al desencofrado.

Iluminación

A partir de 1951, cuando construye sus primeros paraboloides, Candela busca variantes a los paraguas simétricos, horizontales. Los paraguas se asimetrizan y se inclinan. Por las hendijas que se forman entre las parejas de paraguas contiguos entran franjas de luz natural que iluminan homogéneamente el recinto techado. En las obras de arquitectura muy elaborada, como la Iglesia de la Virgen Milagrosa, la Iglesia de San José Obrero, la Capilla de San Vicente de Paúl o la Planta embotelladora Bacardí, la iluminación es contundente. Los vitrales multicolores se disponen en grandes espacios triangulares, en arcos o en secciones parabólicas.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 27)
Iglesia de San Pedro de Durazno
(F. 28)
Iglesia de Atlántida

Por su parte, Dieste incluye ventanas o lucernarios, como él gusta llamar, en la discontinuidad existente entre bóvedas de doble curvatura contiguas, que iluminan en forma pareja toda la superficie cubierta, análogamente a las cáscaras de Candela. El corte longitudinal de los paraguas inclinados de Candela o de las bóvedas de doble curvatura discontinua de Dieste presentan un aspecto similar al de un diente de sierra atenuado. En obras particulares, como las conocidas Iglesias de Atlántida y de San Pedro de Durazno, la iluminación natural es contenida y fuertemente expresiva. A veces posee color, otras veces se cuela por superficies de ónix traslúcido. Puede ser indirecta o, por el contrario, sutilmente dirigida al presbiterio o a la pila bautismal.

Orígenes, formación, interrogantes, encuentro final

Félix Candela nace en 1910 en Madrid. Dieste nace en 1917 en Artigas, una ciudad pequeña en el extremo norte de Uruguay.

Candela es hijo de padres españoles, su apellido materno, Outeriño, suena a gallego. Los padres de Dieste son uruguayos. La madre, Elisa Saint Martin, de origen francés. El padre, también Eladio, de familia gallega, con asiento en Rianxo.

Candela hace sus estudios de Arquitectura en su ciudad natal. Después de la Guerra Civil española y el refugio en Francia, en 1939, se exilia en México, patria de sus grandes obras. En 1933 Dieste deja Artigas y con 16 años viaja a Montevideo para realizar sus estudios de Ingeniería Civil. Ambos son atraídos por las ciencias básicas, en las que reciben una formación sólida que marca su futuro y tienen actividad docente en la universidad. Dieste es profesor del curso práctico de Mecánica.

Entre 1939 y 1949 Candela alterna en varias actividades relacionadas con la construcción, autocompleta su formación teórico-práctica y afirma su vocación de construir cáscaras. En 1949 construye la primera cáscara. Dieste se gradúa de ingeniero en 1943. Luego trabaja en varias empresas privadas y en el Ministerio de Obras Públicas. En 1946 construye su primera bóveda de ladrillo armado, en un proyecto del arquitecto catalán Antonio Bonet.

En 1940 Félix Candela se casa con su novia española, Eladia Martín, con quien tiene 4 hijas. En 1944 Eladio Dieste se casa con su novia alemana, Elizabeth Friedheim, con quien tiene 12 hijos.

En 1950 Candela es cofundador de Cubiertas Ala, la empresa donde realiza la mayoría de sus obras. En 1954 nace Dieste y Montañez, empresa fundada por Dieste y su compañero, el ingeniero Eugenio Montañez, donde Dieste idea las bóvedas de ladrillo armado.

Es intensísima la actividad constructiva de Candela en la década de los 50. La obra de Dieste tiene un ritmo menor, pero se extiende hasta su retiro por enfermedad, en 1994. Los dos profundizan sus conocimientos sobre el comportamiento estructural de las cáscaras. Los cálculos se basan en hipótesis simples. Se buscan geometrías que optimicen las funciones. Ambos expresan que un buen proyecto se puede calcular con facilidad.

Ambos maestros saben que sólo siendo proyectistas y constructores pueden desarrollar su obra creativa. Contribuyen el entorno y el momento. En el inicio de los 50 México y Uruguay viven un auge económico, los salarios de los obreros son moderados y las normas constructivas aún no son estrictas. En ese ámbito la creatividad no se ve frenada. De alguna manera, el proyectista-constructor es el dueño y el responsable de la obra. Cuesta no formularse algunas interrogantes. ¿Qué habría creado Candela si hubiera podido ir a estudiar en la desarrollada Alemania, en usufructo de la beca ganada poco antes de estallar la Guerra Civil? ¿Qué habría creado Dieste si hubiera vivido en un país desarrollado, maniatado por rígidas normativas técnicas?

No sé si Candela es religioso. Dieste cree profunda y austeramente en Dios. Más allá de sus coincidencias o divergencias religiosas, es en los proyectos de las iglesias donde ambos dan vuelo a su irrefrenable necesidad de armonía y belleza, de economía y sencillez, de color, luz y espiritualidad.

Candela y Dieste, ¿se han encontrado? ¿se conocen? Las noticias del mundo menos desarrollado se abren paso lentamente. He oído esporádicamente a Dieste mencionar el nombre de Candela. No recuerdo alguna opinión suya sobre Candela. Tampoco sobre otros diseñadores de cáscaras, salvo una medida admiración por Gaudí. Los creadores se ocupan de su propia obra.

Candela muere en 1997, Dieste en 2000. En 2005 Eladio Dieste es homenajeado en Nueva York con el premio Félix Candela, sirviendo esa ocasión, de alguna manera, para el encuentro póstumo entre los dos maestros.

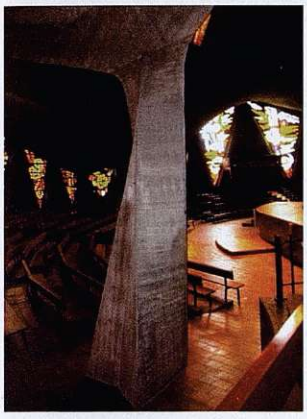
FUNDACIÓN JUANELO TORRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Apoyar

Javier Manterola

Dr. Ingeniero
Catedrático de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid UPM, España
Premio Nacional de Ingeniería 2003
Académico de la Real Academia de San Fernando



(F. 1)

Soporte de los paraboloides hiperbólicos que configuran la Iglesia de la Virgen de Guadalupe en Madrid
F. Candela

En el apoyo de una estructura se resumen muchas de las características de su comportamiento resistente. La configuración formal de la misma establece la manera en que se transmiten las cargas desde su origen hasta su desembarco en el suelo. Realizar bien este trayecto es un problema especialmente importante en las estructuras superficiales y, dentro de éstas, en aquéllas que utilizan la forma para resistir como son las estructuras laminares. Configurar el camino y el desembarco de las fuerzas de peso propio y de las sobrecargas vivas hasta el suelo, en el caso de las láminas y sobre todo de las membranas, objeto principal del trabajo de Candela. Y el problema es doblemente importante pues la forma de recoger la carga es fundamental tanto resistente como estéticamente. Una lámina bien apoyada traduce como pocas cosas el ser de la misma (F. 1). Este problema ha estado presente a lo largo de toda la historia de la construcción.

La construccion en piedra

Desde la más remota antigüedad, la construcción en ladrillo o piedra se enfrenta con el paso de una superficie continua, generalmente la cubierta, a unos apoyos puntuales necesarios para poder deambular y penetrar en el interior del espacio configurado por aquélla. La relación entre la carga puntual que las columnas transmiten al suelo y la superficie continua de la cubierta ha variado considerablemente.

El arte antiguo hace, en esencia, siempre lo mismo, una bóveda cilíndrica que se prolonga hacia abajo con paredes verticales que llegan hasta el suelo, a las cuales se le producen distintas perforación transversales para poder entrar. Esa pared vertical perforada se configurará posteriormente como una arcada múltiple sobre la cual reposará la bóveda continua.

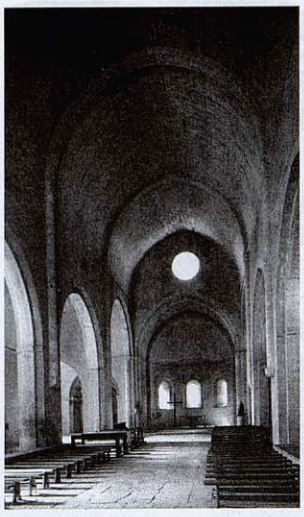
El arte románico configura un espacio similar, una bóveda cilíndrica apoyada en una arcada múltiple. El arco fajón es más un adorno del conjunto, pues la geometría de la bóveda y su comportamiento resistente no permiten trasladar las fuerzas a ese punto, sino que la bóveda se descarga en el arca múltiple, que la lleva a los pilares, en una respuesta de apoyo perfecta. La bóveda continua descarga su peso en las arcadas longitudinales las cuales llevan su carga al pilar (F. 2).

La columna aparece como tal al empezar a sintetizarse el papel que cumple el elemento portante en la arcada múltiple Se individualiza, se comprende su misión y se manifiesta como apoyo por excelencia.

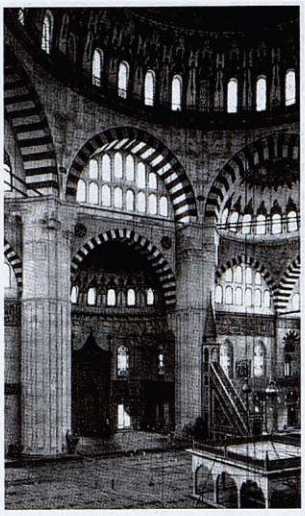
Y si esto se produce en la nave longitudinal de una simple iglesia románica, lo mismo ocurre cuando ésta toma forma cupular derivada del Panteón de Roma y del arte bizantino, como en San Vital de Rávena (F. 3), en la cual la cúpula descarga su acción en un cilindro perforado que descarga, a su vez, su efecto sobre una arcada múltiple circular que descansa sobre pilares. Un elemento uniforme, una bóveda, una cúpula, descarga su acción en otro elemento, una pared vertical, que por medio de otro elemento, arcada múltiple o pechinas, lo traslada a una columna y de ésta al suelo. Y esto mismo va a pasar en todas las grandes mezquitas otomanas (F. 4). El apoyo se define con nitidez en estos estilos arquitectónicos.

Desde un punto de vista constructivo el espacio se configura con la realización de una columna que soporta una arcada múltiple la cual soporta una bóveda cilíndrica, lo contrario a la anti-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO









(F. 2)
Abadía de Thoronet, 1136
(F. 3)
San Vital de Rávena, 547
(F. 4)
Mezquita de Selim, 1568
Edurne M. Sinan
(F. 5)
Ábside de la Catedral de León

gua definición de una bóveda cilíndrica que reposa en un muro vertical, el cual es perforado para pasar.

El contrafuerte, el espesor del muro o la disposición de bóvedas paralelas resolverán el problema del empuje horizontal.

El gótico introduce un cambio fundamental. La cubierta se pliega, se nerva y la columna aparece natural como una parte más de la cubierta que se prolonga hasta el suelo. El apoyo se configura en todo su esplendor. La iluminación y la transparencia del muro llevan casi a constituir una estructura moderna de pilares y arcos entrelazados formidables. La cubierta, al plegarse, conduce las fuerzas y configura su comportamiento para hacer natural el hecho de resistir. Ya no estamos como en el románico con una cubierta que necesita de otro elemento continuo como es la arcada múltiple para transportar esta solicitación continua al apoyo puntual. Es ella misma la que genera el apoyo. Se establece una formidable relación bi-unívoca entre forma de la cubierta y apoyo (F. 5).

Pero el formidable hallazgo del plegamiento se olvida hasta casi la época moderna. El Renacimiento, mirado desde un punto de vista resistente, vuelve conceptualmente al románico y a todos los problemas que éste no había resuelto (F. 6). La fisuración radial de la parte inferior de las cúpulas que las convierte en una serie de arcos adyacentes en la parte inferior, perdurará y pondrá en peligro desde Sta. Maria dei Fiori hasta el Vaticano, incapaces de controlar las deformaciones circunferenciales que aparecen en toda cúpula de ángulo mayor de 38° desde la vertical. La sucesiva fisuración radial aparecerá desde el Panteón de Roma. Cuando Bramante proyecta, hacia 1506, la cúpula de San Pedro, lo que hace es transplantar las consecuencias del Panteón a la Basílica de San Pedro. Miguel Ángel la cambia y realiza una cúpula moderna pero equivocada, que traerá a mal traer a la técnica hasta el siglo XVIII.

El gótico había resuelto perfectamente este problema con su plegamento. Al eliminar la rigidez circunferencial de la cúpula, elimina la fisuracion radial y mantiene perfectamente el equilibrio. Sólo el genial Borromini vuelve a utilizar el plegamento de la cúpula en S. Ivo alla Sapienza de Roma en 1643.

Cúpulas esféricas, bóvedas cilíndricas, arcada múltiple y soportes adornados o no con arcos fajones serán el *leitmotiv* de la manera de construir posterior. Todo el estriamiento longitudinal de los pilares, convertidos transversalmente en la forma de la arcada múltiple y longitudinalmente en arcos fajones, los individualiza y ciertamente los convierte en soportes perfectos. La construcción en piedra determinó muy bien lo que es apoyar.

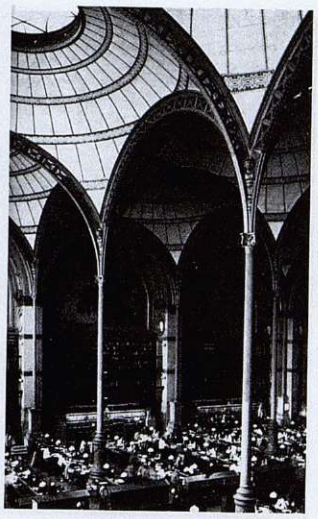
El hierro y el acero

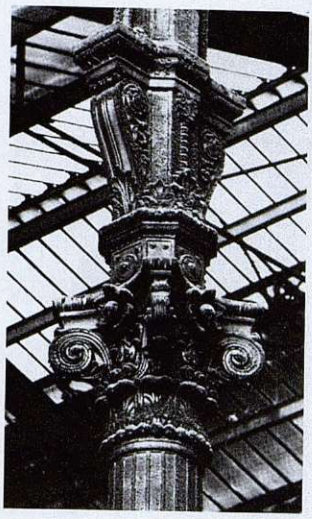
El advenimiento a principios del siglo XIX del hierro y el acero como material básico constituyó una ventana de aire fresco en este proceso de entender lo que es y significa apoyar. Fuera de los planteamientos en piedra, en los cuales la indefinición de las partes constitutivas del

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO









(F. 6)

San Andrea, Mantua, 1472
L.B. Alberti

(F. 7)

Galería de Máquinas, París, 1889

(F. 8)

Biblioteca Nacional, París
H. Labrouste

(F. 9)

Capitel de fundición

apoyo no está especialmente determinada sino que constituye un *totum revolútum* en el cual la precisión de la definición no es tan importante, ya que el carácter masivo de los enlaces hace que los esfuerzos encuentren su propio camino. En cambio, la obligada y prístina definición a que va a obligar el acero deberá disponer la pieza correspondiente para cada esfuerzo si queremos que la estructura no falle. Los elementos lineales obligan a una definición precisa de los enlaces y dentro de ella de los apoyos.

Si miramos la Galería de Maquinaria de la Exposición Universal de 1889 vemos la clara definición de las rótulas cuando los pórticos llegan al suelo (F. 7). Si nos fijamos en la definición de los apoyos en la Biblioteca Nacional de París por H. Labrouste, de 1863, la precisión del apoyo no puede ser mayor aun con la presencia de su pequeño capitel que sirve de elemento de transición entre los arcos principales de las cúpulas y el pequeño pilar (F. 8).

La presencia de capiteles es a veces elemento de transición y transmisión de esfuerzos, y a veces, las más, elemento decorativo (F. 9).

La construcción moderna

En el siglo XX, y principalmente en su primera mitad, eclosionan una serie de constructores formidables, que, en el tema del que estamos hablando, podrían ser Candela, Torroja, Nervi, Fuller, Nowicki, etc., todos ellos relacionados con las estructuras laminares, aunque sus manifestaciones sean diferentes y de distinta profundidad. Dos de ellos, Candela y Nervi, sobre los cuales voy a incidir con más intensidad son proyectistas y constructores, y ambas características van a influir en sus logros y contribuciones al mundo de la construcción.

Ambos establecen configuraciones formales formidables, bellísimas, pero mucho menos penetrantes en el problema laminar que las de Torroja, verdadero genio de las estructuras. Simplifican los problemas resistentes para facilitarse el trabajo de construir.

En lo que se refiere al apoyo de sus estructuras Nervi no falla nunca. En el Pabellón de Turín (F. 10), los arcos ondulados y prefabricados con que resuelve la cubierta, los encamina a las pilas a través de una viga inclinada que, por flexión en su plano, desvía las cargas de los arcos hacia los apoyos, con la pericia formal de gravar en las mismas unas nervaduras que convergen hacia el pilar como si éste fuese el itinerario natural de las cargas. Recurso formal formidable que permite realizar una transición hacia el apoyo muy adecuada. Nervi será un maestro en este oficio.

En el Palacio de los deportes de Roma (F. 11), así como en el Palaceto de la misma ciudad (F. 12), no aprovecha la capacidad de los faldones de la cúpula como zunchos para transformar la carga inclinada en vertical, como sí hará en la semicúpula adjunta al Palacio de Turín (F. 13). Se limita a recoger los nervios plegados de su cúpula y transmitirlos de nuevo, a través de una viga circular inscrita en la cúpula, a una serie de pilares interiores a través también de una ramificación desde las pilas radiales exteriores al ámbito de la gran cúpula.

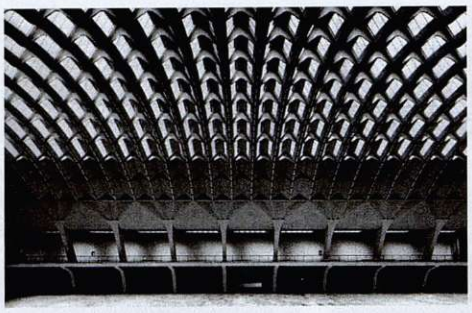
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 10)

Pabellón de exposiciones de Turín
P.L. Nervi

(F. 11)

Palaceto de los deportes de Roma
P. L. Nervi





(F. 12)

Palacio de los deportes de Roma
P.L. Nervi

(F. 13)

Pabellón de exposiciones de Turín
P.L. Nervi





El Palaceto insiste en recoger la carga inclinada que transmite la cúpula por los pilares radiales exteriores. El efecto de zuncho del borde de la cúpula, lo elimina plegándola como en el gótico (F. 12).

¿Qué diferencia formal y conceptual con el mercado de Algeciras? (F. 14). Torroja hace lo que debe de hacer para apoyar su cúpula en apoyos puntuales. Rigidiza el borde libre plegando la superficie y encaminando de una manera natural los esfuerzos superficiales de la cúpula hacia los apoyos puntuales.

Este mismo planteamiento del borde lo va a utilizar Heinz Isler en muchas de sus cúpulas sobre apoyos puntuales, aunque a veces, a nivel formal y sólo a nivel formal, doble el apoyo hacia arriba como si la cúpula se apoyase plácidamente y verticalmente en sus cimientos cuando, por detrás de la cara exterior vista, la cúpula se regruesa en la dirección pertinente para conseguir canalizar (F. 15), a los cimientos atirantados, las fuerzas inclinadas que se concentran en esos puntos.

Y éste es un problema formal importante. Piano realiza el apoyo de las láminas en el suelo, en su proyecto para la Palacio de los deportes de Rávena. Hace lo mismo que Nervi. Pliega sus arcos dirigiéndolos hacia uno de los extremos de su diámetro donde maciza la terminación para efectuar la transición hacia los dos grandes apoyos puntuales (F. 16).

La concentración de cargas en un solo pilar, tan formidablemente resuelto en la Iglesia de Toulouse (F. 17), y para superficies abovedadas nervadas, Nervi lo enfrenta en su Palacio del Lavoro de Turín con la perfección y consistencia a que nos tiene acostumbrados a través de un collarín en donde se reúnen las distantes vigas radiales que soportan la cubierta (F. 18). Algo parecido, aunque diferente, hicimos nosotros en la cubierta de la Estación de Atocha, establecer el apoyo, empotrado, para relacionar una superficie nervada con un pilar (F. 19).

Candela fue uno de los grandes artífices en configurar espacios a base de superficies laminares, principalmente paraboloides hiperbólicos, la superficie reglada con que va a desarrollar su trabajo. Fue asombroso su mérito trabajando como autodidacta en un interminable número de cubiertas de iglesias, naves industriales, etc., que a muchos nos hizo adentrarnos, un poco más, en un hermoso mundo, el de soportar con pocos centímetros de espesor grandes cubiertas, utilizando únicamente la forma. Nosotros teníamos en casa al mejor, Torroja, pero el trabajo de Candela con tan poco bagaje científico y tanta intuición resistente y constructiva hacía que las láminas estuviesen más próximas. El frontón Recoletos estaba demasiado lejos.

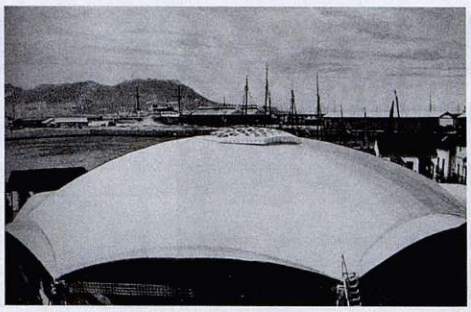
FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

(F. 14)

Mercado de Algeciras
E. Torroja

(F. 15)

Mercado
H. Isler



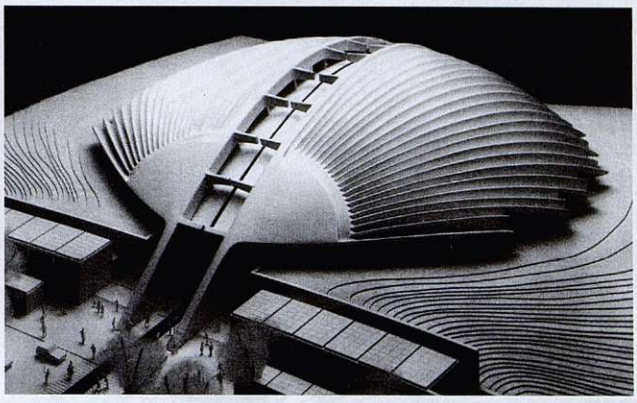


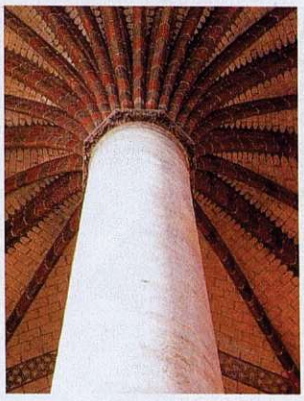
(F. 16)

Palacio de los deportes de Rávena
R. Piano

(F. 17)

Iglesia dominica de Toulouse





(F. 18)

Palacio del Lavoro de Turín
P.L. Nervi

(F. 19)

Estación de Atocha de Madrid
R. Moneo y J. Manterola





Y lo primero que hay que considerar son los "paraguas" de bordes rectos formados por cuatro paraboloides hiperbólicos adosados. Los hizo de todos los tamaños y disposiciones, de una manera fácil y repetitiva, produciendo cubiertas extraordinariamente hermosas y simples. Un pero. El soporte cuadrado que se empotra en la lámina, lo hace sin hacer coincidir sus aristas con las aristas que determina el paraboloide. Candela, que hace el soporte más precioso que puede darse en una lámina en la Iglesia de la Milagrosa en 1954, se equivoca, a mi entender, en ese clavarse de la arista del pilar en la superficie lisa del paraboloide, que podría haber evitado sin más que girarlo ligeramente (F. 20).

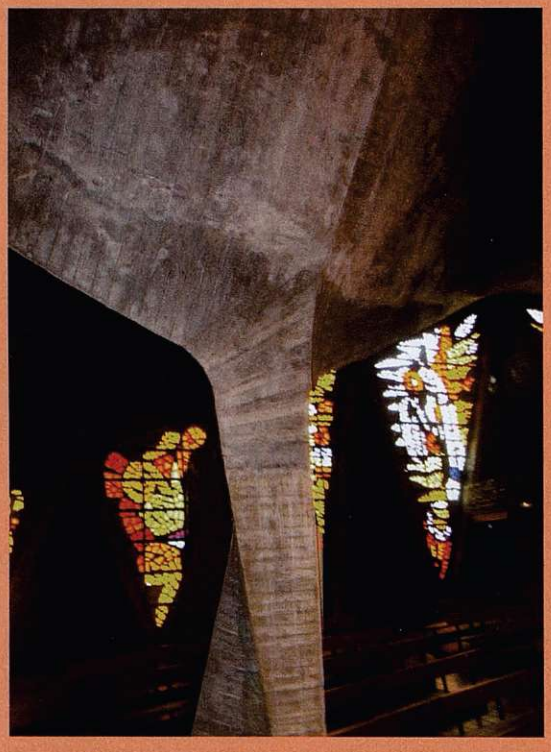
La iglesia de la Virgen Milagrosa no puede ser más clásica y tradicional por su configuración espacial. Sin embargo, Candela realiza un ejercicio prodigioso con los paraboloides hiperbólicos acodándolos entre sí para realizar pórticos transversales, apuntados, en los cuales el trabajo de los paraboloides es secundario. El apoyo puntual que diseña es prodigioso en cuanto a la forma, disposición y continuidad con los paraboloides que sostiene, al igual que en la Iglesia de Nuestra Sra. de Guadalupe de Madrid (F. 21)[1]. En esta dirección coincide fuertemente con los apoyos puntuales de Gaudí en la capilla de Santa Coloma de la colonia Güell (F. 22).

[1] Los pilares representados no son los de la Virgen Milagrosa de México, sino de la de Madrid, también de Candela.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 20)



(F. 21)

(F. 20)

Paraboloides
F. Candela

(F. 21)

Pilares de la Iglesia de la Milagrosa en Madrid
F. Candela

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

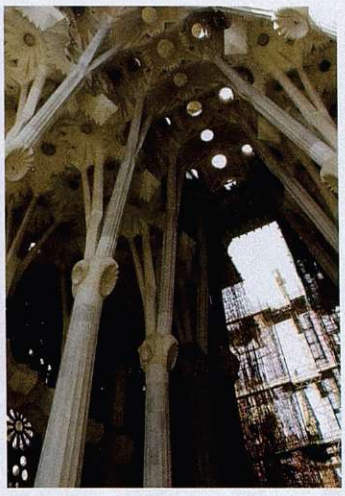
(F. 22)

Santa Coloma
A. Gaudí

(F. 23)

Interior de la Sagrada Familia
A. Gaudí





Y ya que hemos topado con Gaudí, nada comparable, nada similar con la concepción de lo que es apoyar que tiene Gaudí en la iglesia citada, en el parque Güell, en la Sagrada Familia, etc. Conoce la trayectoria de las fuerzas, coloca las pilas en posición y realiza una formidable transición entre cubierta y pila, perfecta para sus dimensiones y el material que utiliza. En la (F. 23) representamos el estado actual del soporte de la cubierta de la Sagrada Familia. Las estructuras arbóreas, tan presentes en muchos de los trabajos alemanes actuales, están perfectamente desarrolladas en Gaudí.

Volviendo a Candela, la lámina (F. 24) de la Oficina de ventas de Guadalajara refleja, como pocos casos, la dificultad que se presenta al apoyar las láminas en el suelo, la sensación de debilidad que presenta la simple prolongación y recorte de la forma de la lámina para configurar un soporte puntual o superficial posiblemente empotrado en el cimiento.

Si esto es así, como ocurre en posiblemente la obra más famosa de Candela, el restaurante de Xochimilco, la unión es mala. No se debe empotrar una debilidad, como es la prolongación de la lámina, pues las deformaciones impuestas de giro pueden fácilmente crear problemas. Estas uniones deber ser, a mi entender, articuladas.

Xochimilco es probablemente la lámina más valorada de Candela, de 32m de luz y 44m de envergadura total entre bordes extremos. Se ha imitado en bastantes circunstancias (F. 25). Schlaich la realiza en Stuttgart en hormigón armado con fibras de vidrio, con un tamaño algo menor. En Valencia (España), en la Ciudad de las Artes se ha reproducido en un tamaño ligeramente mayor que en Xochimilco.

Su comportamiento resistente es elemental y con tensiones muy bajas para carga permanente uniforme, pero para carga de viento, con su presión y succión, la lámina funciona bastante peor. Se producen flexiones transversales que es necesario controlar, bien con el espesor de la lámina o con arcos transversales sobre los 8 lóbulos o rigidizando los ocho nervios principales que van al suelo que es lo recomendado para Valencia. En la (F. 26) represento la gran deformación transversal de la lámina de Valencia para viento transversal.

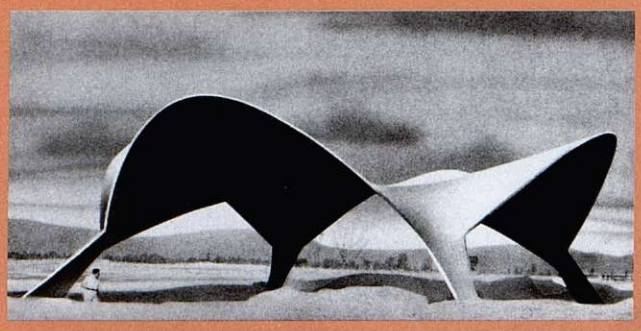
Con respecto al apoyo también hay muchas cosas que decir. El empotramiento en el cimiento es inadecuado, a mi entender, al someter a la lámina a un conjunto de deformaciones impuestas por el cimiento que pueden causar fisuraciones en el cuerpo de la lámina.

En este sentido, la solución de Schlaich, articulada –incluso materializando una bola dentro de una urna de cristal– es la más adecuada (F. 27). Además el hecho de sacar la cimentación del nivel del terreno es extraordinariamente adecuado.

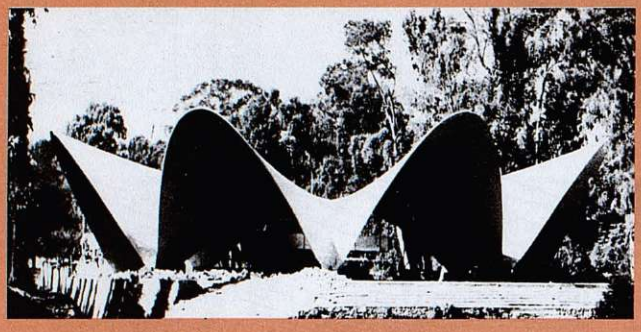
Sánchez del Río, en su polilobulado Palacio de deportes de ladrillo de Oviedo, recurre al mismo tipo de apoyo, una bola de acero metida en una urna de cristal.

Heinz Isler, en su factoría para F. Kilcher en Recherswill, de 1967, realiza una unión peor. La lamina de 9cm de espesor y 25m de luz con forma variable, sin una definición precisa matemática, como le gusta a Isler, se empotra en el cimiento en una doble biela que atiranta con pretensa-

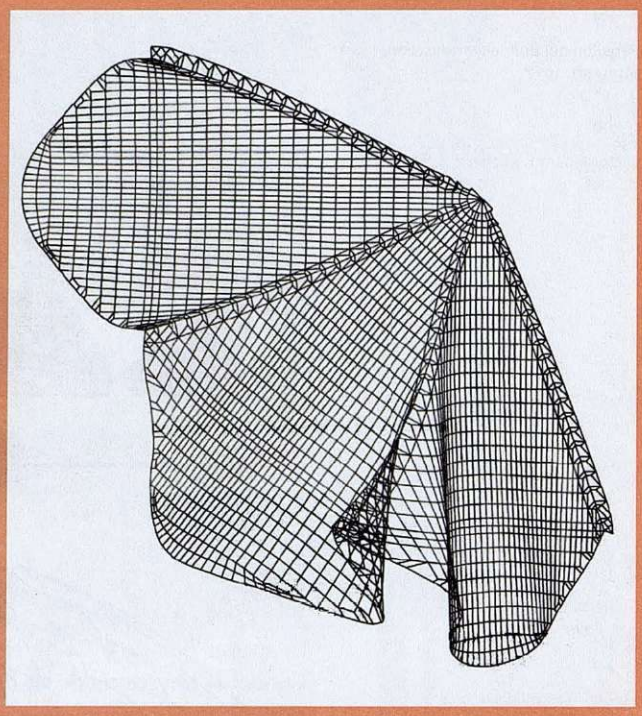
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



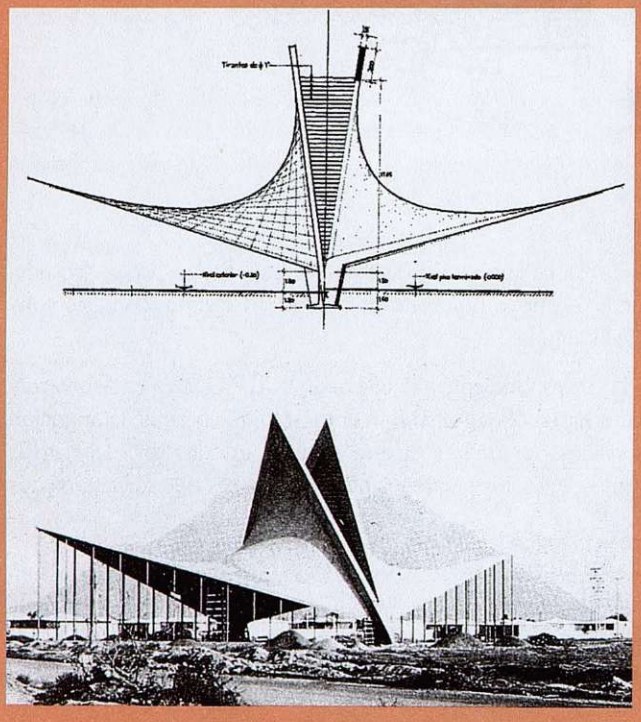
(F. 24)



(F. 25)



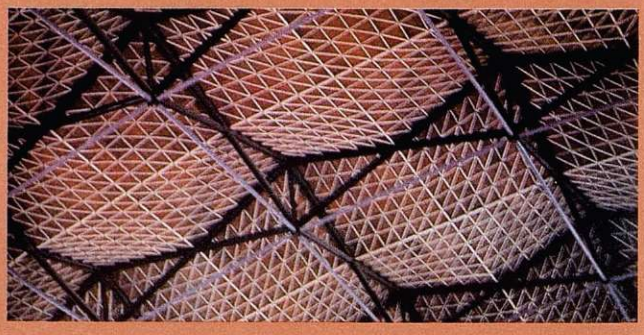
(F. 26)



(F. 29)



(F. 30 a)



(F. 30 b)

(F. 24)

Oficina de ventas en Guadalajara
F. Candela

(F. 25)

Restaurante Xochimilco
F. Candela

(F. 26)

Deformación de los lóbulos de la lámina
de Valencia bajo efecto de viento

(F. 29)

San José Obrero
F. Candela

(F. 30 a, b)

Palacio de los deportes de México
F. Candela

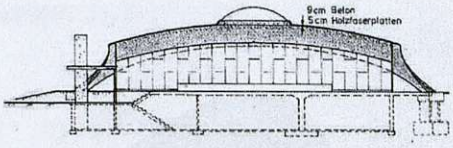
FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

(F. 27)

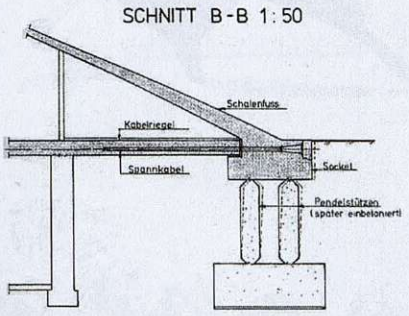
Pabellón del Bundesgartenschan, Stuttgart, 1977
J. Schlaich

(F. 28)

Factoría para F. Kilcher
H. Isler





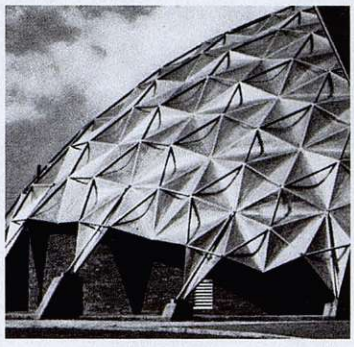


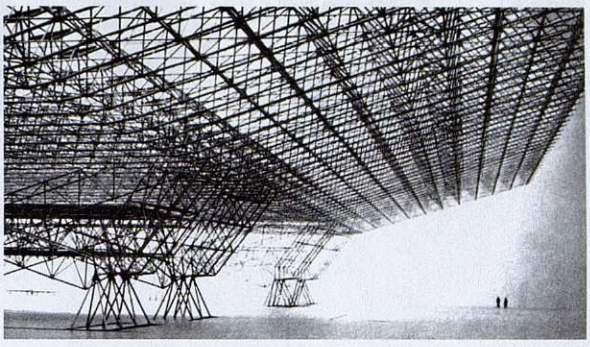
(F. 31)

Cubierta de Aluminio
R.B. Fuller

(F. 32)

Cubierta proyecto
K. Wachsmann





do con las otras cuatro esquinas (F. 28). La lámina puede moverse bajo fuerzas de pretensado. Posteriormente se bloquea totalmente el apoyo por el hormigonado del mismo. Con esto consigue elevar la carga de pandeo de la lámina.

Otra lámina digna de mención es la correspondiente a la Iglesia de S. José Obrero en Monterrey (F. 29). Los dos grandes paraboloides hiperbólicos se sujetan entre sí lo que permite la aparición de dos nervios casi verticales asociados por una estructura metálica que los une. Las cargas desembocarán claramente en dichos nervios, los pequeños pilares verticales que sujetan los dos grandes voladizos con borde libre.

Aun con todas las limitaciones que se quiera la obra de Candela, la realizada sobre láminas de hormigón en los años 50, es formidable. No tan buena su última realización del Palacio de los deportes de México para la XIX Olimpiada de 1968. Una cúpula truncada, que se empeña, y lo hace, en apoyarse en todo el contorno por puntales inclinados, cuando la geometría de la cúpula está configurada para apoyarse en las esquinas (F. 30).

Desarrolla dos familias cruzadas de arcos en celosía, cada uno de los cuales se apoya por sí mismo en los puntales anteriores de hormigón. Olvida el trabajo superficial que una triangulación de arcos habría conducido hacia las esquinas la dirección de los esfuerzos, donde la forma del casquete sugiere. Me parece una equivocación importante.

No quisiera terminar sin citar dos formidables maneras de apoyar, la cubierta de B. Fuller de aluminio (F. 31), y la formidable cubierta no realizada de Konrad Wachsmann (F. 32) en la cual la congruencia resistente y formal de la estructura de los tubos es excelente.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

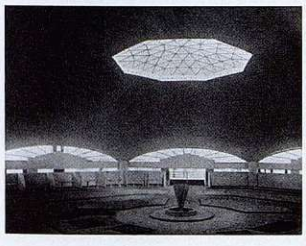
FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Félix Candela y el Paraboloide Hiperbólico: forma estructural y forma visual

José Antonio Torroja

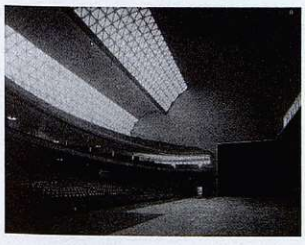
Presidente de AMIET
Profesor Emérito de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid UPM, España
Premio Nacional de Ingeniería 2006

El hormigón armado entró como material estructural en Europa a finales del siglo XIX, y su consolidación en el XX tomó caminos diferentes en el campo de la ingeniería civil y en el de la edificación arquitectónica. En el primero, fueron los avances en las características de los materiales, la innovación en nuevos y más económicos procesos constructivos y la introducción del pretensado los que hicieron del hormigón un material insustituible en las modernas obras de ingeniería. Pero la arquitectura no aceptó tan fácilmente al nuevo material, y su consolidación tuvo mucho que ver con la aparición de las nuevas estructuras superficiales, posibles gracias al hormigón, que permitían cubiertas y cerramientos novedosos. Es cierto que las formas de estas estructuras laminares han de ceñirse a las estrictas reglas de la física, pero también es cierto que queda más que suficiente campo libre para la imaginación y para que proyectistas a la vez creativos y conocedores del comportamiento estructural propusieran formas conducentes a volúmenes y espacios internos nunca antes vistos en arquitectura. Y es interesante analizar cómo esos constructores de láminas pioneros buscaron formas geométricas adaptadas a su función resistente y a la vez capaces de crear en el espectador de la obra sensaciones y sentimientos, derivados de esa geometría, pero no únicamente. Hay algo mágico, que se añade a la rigidez de la forma matemática, que hace que ciertas obras pasen a ser consideradas obras de arte y a producir esas sensaciones y sentimientos a que antes me refería. A estas formas es a las que he llamado forma sensible, la que capta un observador culto y formado, pero no necesariamente conocedor de la geometría, métrica o analítica. Aunque la escuela estructural alemana fue de gran importancia en los albores de las estructuras laminares, en este análisis me voy a referir solamente, además de a Félix Candela, a Eduardo Torroja y a Pier Luigi Nervi, dos ingenieros bien conocidos como pioneros en el proyecto y la construcción de láminas.



(F. 1)
Vista interior del Mercado de Algeciras

Eduardo Torroja (1899-1961), ingeniero español con gran influencia en la consolidación del hormigón armado en España, no proyectó un gran número de láminas, pero las que proyectó, principalmente en la década de los 30 del siglo pasado, tuvieron gran repercusión tanto nacional como internacional. El Mercado de Algeciras (1934) está formado por una cúpula de 48m de diámetro, esférica en su casquete central, y prolongada mediante una superficie tórica hasta los ocho puntos en los que apoya. Para evitar que los bordes libres de la cúpula entre apoyos flecten, aquéllos están rigidizados mediante su intersección con ocho bóvedas cilíndricas periféricas que transfieren las cargas a dichos apoyos. La forma geométrica es algo compleja, con la zona tórica, pero la forma sensible, a mi entender, no sería diferente si la cúpula fuese una esfera única; su carácter depende, más bien, del gran lucernario central y de los lunetos periféricos (F. 1). La cubierta del Frontón Recoletos de Madrid (1936) está formada por dos cañones cilíndricos de radios diferentes que se cortan según una generatriz longitudinal, creando lo que Torroja llamaba una sección "en gaviota". La superficie continua así creada se sustituye, en dos zonas, por triangulaciones que forman dos grandes lucernarios. Si los cañones lisos, sin arcos perpiaños visibles, resultan en general bastante sosos a la vista, la sensación que produce el espacio del Frontón, con su doble cañón disimétrico y sus triangulaciones (F. 2), es, cuando menos, asombrosa. La cubierta del graderío del Hipódromo de la Zarzuela, en Madrid, está formada por sectores de hiperboloide hiperbólico de eje horizontal. Pero, tras estudiar con atención la forma resultante, se decidió inclinar su eje, desplazar su garganta respecto al apoyo y sustituir las hipérbolas de intersección de cada dos módulos por rectas. El resultado es que la superficie de cada módulo no es un hiperboloide, pero se le parece, es estructuralmente igualmente válido y esté-



(F. 2)
Vista interior del Frontón Recoletos

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 3)

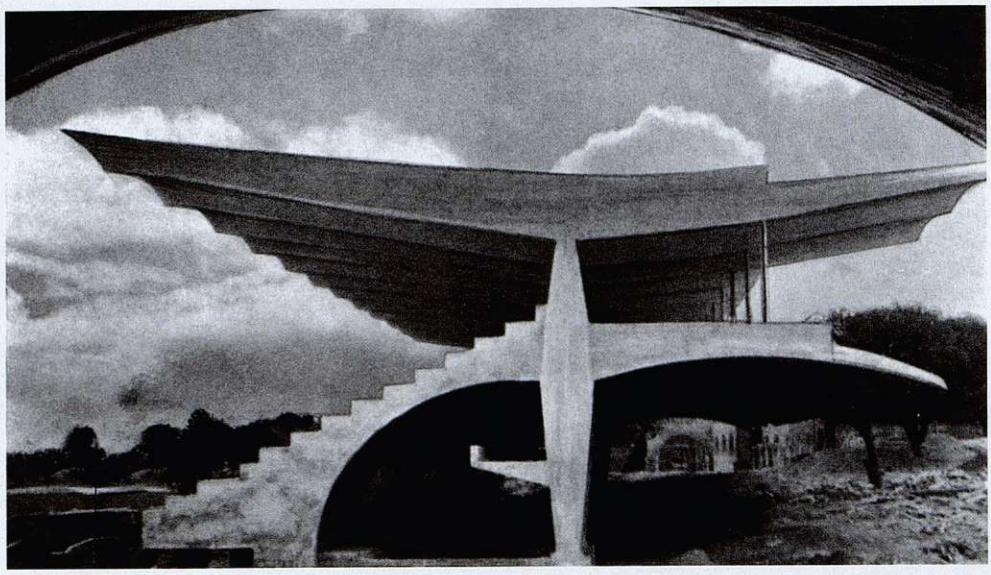
El Hipódromo de la Zarzuela en construcción

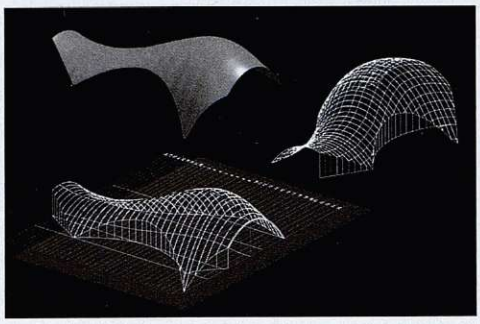
(F. 4)

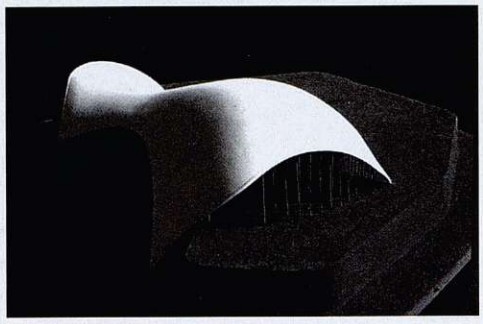
Generación de la cubierta del Club Táchira, Venezuela

(F. 5)

Maqueta de la cubierta del Club Táchira



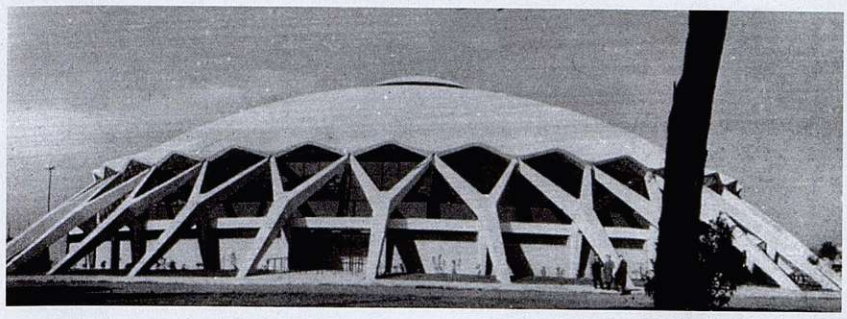


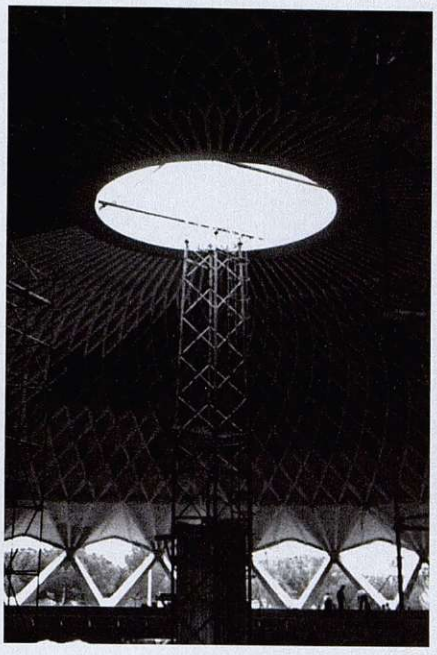


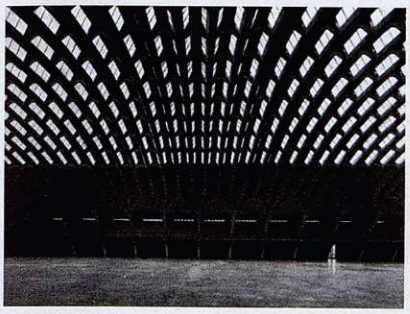
ticamente más potente (F. 3). En la década de los 50, Torroja proyectó varias estructuras laminares de forma totalmente libre, algunas de ellas de ladrillo armado, como la Iglesia de Pont de Suert, en Lérida. Entre ellas, destaca la cubierta del Club Táchira, en Venezuela, que no llegó a construirse. El proyecto respondía a la petición del arquitecto Fruto Vivas, de realizar una cubierta de unos 60x40 m, que él mismo definía con sus manos y un pequeño croquis. Como resultado, Torroja generó una superficie a partir de una catenaria invertida que se traslada paralelamente a sí misma con su vértice recorriendo una curva directriz alabeada en el espacio, definida mediante un polinomio trigonométrico -proyección vertical- y una serie de parábolas de 2º y 3º grado -proyección horizontal-. La superficie así generada queda limitada por cuatro planos verticales y por un cilindro parabólico, de eje también vertical (F. 4). Parece muy complicado, pero el resultado es formalmente muy simple, resistentemente válido y parecido a la imagen visionaria del arquitecto (F. 5). En definitiva, de lo anteriormente comentado resulta que, si exceptuamos el Frontón Recoletos, las formas laminares de Torroja no son definibles geométricamente mediante una función simple, y nunca las repitió, de forma que si la forma sensible es diferente en todas ellas es porque sus formas geométricas también lo son. Por ora parte, la dificultad de un cálculo analítico de estas estructuras, prácticamente inabordable en aquella época, nunca fue freno para esta libertad formal; con su gran conocimiento del comportamiento estructural, Torroja calculaba los esfuerzos de forma aproximada, y luego comprobaba sus cálculos experimentalmente sobre modelos reducidos de microhormigón.

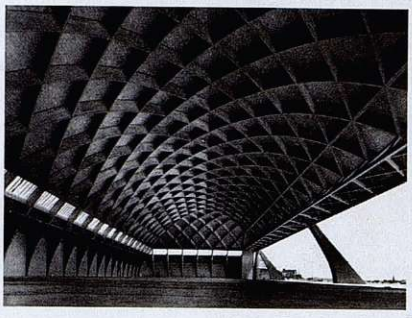
Por otra parte, Pier Luigi Nervi (1891-1979) fue, sin duda, el ingeniero italiano de mayor prestigio e influencia en el desarrollo del hormigón en Europa a lo largo de su dilatada vida profesional. En 1920 fundó su propia empresa constructora, desde la que materializó sus exquisitas concepciones. Sus obras más interesantes se reparten desde la década de los 30 a la de los 60. En estos años, construyó diferentes cubiertas, varias de ellas laminares, pero utilizó pocas formas geométricas. Sus cúpulas son esféricas, apoyadas prácticamente en todo su contorno, como el Palazzetto dello Sport, en Roma (F. 6), y sus bóvedas son cilíndricas de directriz parabólica, apoyadas en sus generatrices extremas, como la del Salón de Exposiciones de Turín (F. 7). Los

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO









(F. 6)
Palazzetto dello Sport de Roma
(F. 7)
Salón de Exposiciones de Turín
(F. 8)
Hangar de Orvieto
(F. 9)
Encasetonado del Palazzetto dello Sport

interesantísimos hangares, como el de Orvieto, son también como una bóveda apoyada en el muro trasero y en una gran viga espacial frontal (F. 8). Pero, por otra parte, Nervi creó en su empresa la técnica del ferrocemento, que le permitía fabricar unos ligeros casetones utilizados para encofrados perdidos de superficies de hormigón, que dejaba vistos al interior, proporcionando unos acabados realmente extraordinarios. Y, dada la dificultad de encofrado de madera de una cúpula, Nervi utilizó sus casetones, aunque con formas diferentes, para las dos que construyó (F. 9). Y en sus bóvedas, razones estructurales le llevaron –como ya hiciera Freyssinet en los hangares de Orly– a plegar la superficie para ganar rigidez, utilizando de nuevo unas piezas onduladas prefabricadas de ferrocemento. El mismo incremento de rigidez mediante nervios, prefabricados o no, utiliza en los hangares. El resultado es que, aunque Nervi utiliza muy pocas formas geométricas, sus formas sensibles son diferenciables e inmediatamente reconocibles. Si Torroja utilizó siempre superficies limpias y desnudas, Nervi, al menos interiormente, recurrió siempre a lo "nervado" para construir y definir la forma sensible de sus estructuras laminares.

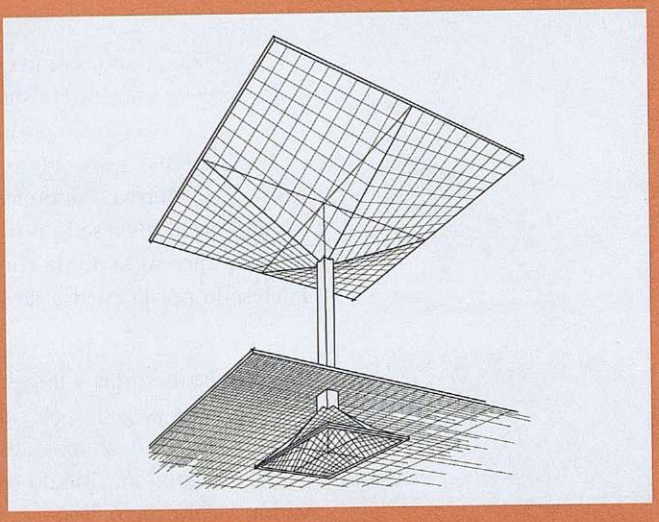
Félix Candela (1910-1997) nació en España y en Madrid estudió su carrera de Arquitectura. La estructura de la carrera de entonces hizo que Félix estudiase un curso de Matemáticas, principalmente geometría, en la Facultad de Ciencias Exactas de la Complutense, lo que le proporcionó una base teórica que sería de gran importancia en su forma de ejercer la profesión posteriormente. Al terminar la Guerra Civil española, en 1939, Candela se exilió a México, donde se estableció tanto personal como profesionalmente. Fundó la empresa constructora Cubiertas Ala, desde la que desarrolló una gran actividad, proyectando y construyendo más estructuras laminares que cualquier otra persona o empresa en el mundo. En 1968, tras enviudar cinco años antes, volvió a contraer matrimonio con una arquitecta norteamericana, trasladando su residencia a Chicago y, más tarde, a Nueva York y Madrid. Dejó su actividad en Cubiertas Ala y dedicó una parte importante de su tiempo a la docencia, sin abandonar por ello su actividad como proyectista, colaborando con firmas americanas y españolas. Pero, a mi entender, su obra más importante y en la que Félix Candela se muestra más creativo e independiente de otras corrientes de la época, es la que desarrolló en México entre finales de los 40 y finales de los 60, y a esta época me voy a referir en lo que sigue.

Una característica de Félix Candela, quizá sólo encontrada también en Nervi, es la de ser a la vez proyectista y constructor de sus propias obras. Quiere esto decir que, solo o a propuesta de otros arquitectos, recibía el encargo de desarrollar el proyecto estructural y construir la obra en cuestión. Esto tenía gran importancia para Candela, porque el proyecto –y aquí nos referimos a lo que hoy llamamos proyecto de construcción– y la propia construcción iban juntos en un

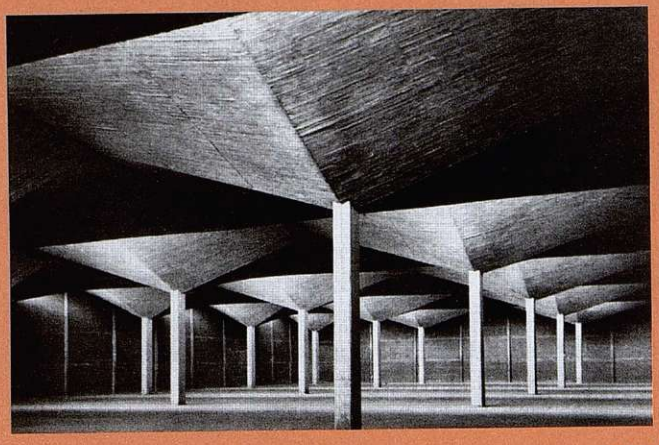
FUNDACIÓN JANELO TURRIANO



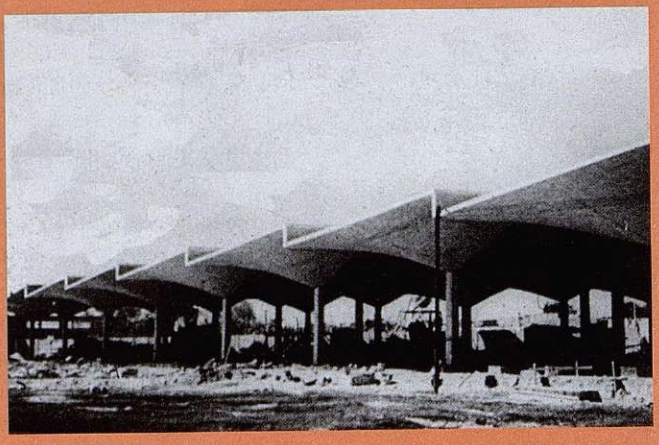
(F. 10)



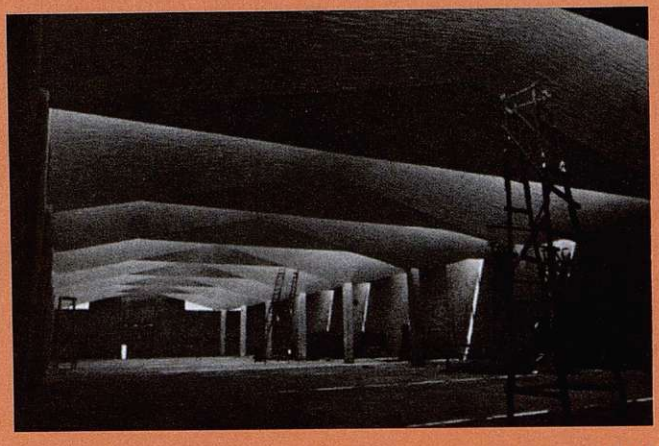
(F. 11)



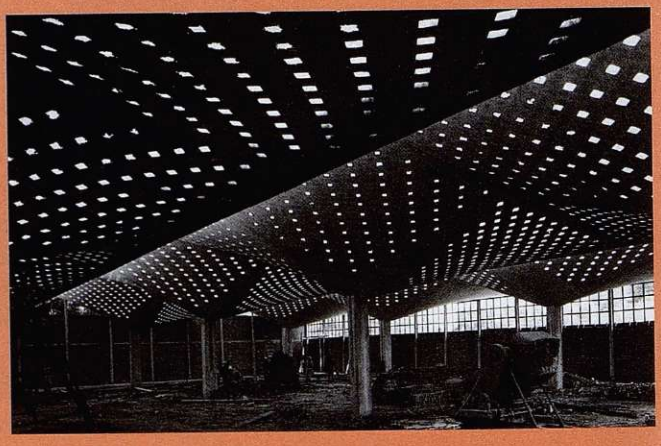
(F. 12)



(F. 13)



(F. 14)



(F. 15)

(F. 10)
Laboratorio de Rayos Cósmicos
(F. 11)
Esquema de paraguas
(F. 12)
Almacén de Celestino
(F. 13)
Almacén de Río
(F. 14)
Segundo almacén de Río
(F. 15)
Fábrica textil en Coyoacán

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

solo paquete económico. Para él, tan importante era ahorrar en el coste del proyecto –en particular, el del cálculo– como en el del acero. Para Candela, el poder calcular la estructura y comprobar que era segura, constituía un requisito indispensable antes de comenzar su construcción; y, además, el cálculo no podía consumir un porcentaje importante de los recursos económicos de que disponía. Este sentido de la importancia del cálculo, por una parte, y de la necesidad de realizarlo de forma económica, por otra, es típico y diferenciador en el arquitecto Félix Candela; un arquitecto interesado por conocer el comportamiento estructural, interesado por las matemáticas, interesado por la construcción –y, por tanto, interesado por la economía– y no menos interesado por la estética de sus propias concepciones.

Félix Candela utilizó para sus estructuras multitud de formas geométricas y estructurales: láminas cilíndricas cortas y largas, de directriz catenaria, conos y conoides, cúpulas esféricas y elípticas, láminas plegadas, etc., algunas de ellas varies veces repetidas, aunque siempre adaptadas a sus requisitos funcionales. En cada una de éstas, la forma sensible viene muy marcada por la geométrica, aunque ésta no se repita nunca exactamente igual. Por ejemplo, creo que un observador atento, pero lego en geometría, que visitase Boliches Marsella y el Almacén de Las Aduanas sería capaz de intuir que, a pesar de las diferencias sensibles, la forma geométrica de la primera y la de la nave central de la segunda es la misma. Pero, aparte de estas formas geométricas más o menos clásicas, Candela iba buscando formas más eficientes desde diferentes puntos de vista. Y el paraboloide hiperbólico apareció a sus ojos como la forma geométrica ideal. Se trata de superficies de doble curvatura negativa, o anticlásticas, lo que confiere a su superficie una gran rigidez estructural, permitiéndola transferir cargas normales a su superficie mediante esfuerzos tangentes a ella misma, trabajando en estados de membrana o de "cascarón", como acostumbran llamar a estas formas en los países americanos de habla hispana; su definición analítica es la función de segundo grado más simple, z=kxy, lo que simplifica no sólo los cálculos geométricos sino también los estructurales; su superficie está generada por dos familias de generatrices rectas, lo que simplifica fuertemente su construcción frente a otras formas también de doble curvatura, pero sinclásticas, como las cúpulas. Aunque el análisis de las razones que da Candela para simplificar el cálculo de sus cascarones, despreciando el cálculo elástico de las flexiones en sus paraboloides, es muy interesante y muy actual, me interesa aquí sólo analizar el uso que hizo de estas formas geométricas para generar las formas sensibles de sus obras.

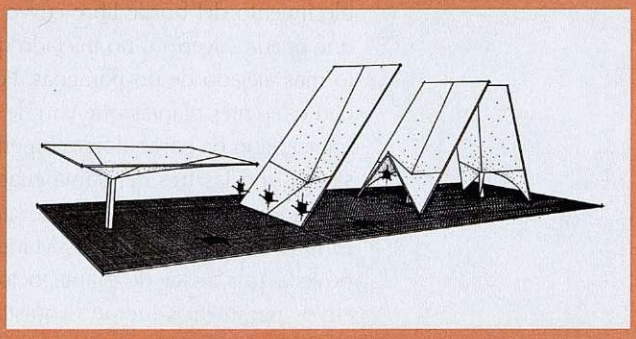
La primera vez que Candela utiliza el paraboloide hiperbólico, o *hypar*, es en el Pabellón del Laboratorio de Rayos Cósmicos de la UNAM (F. 10). La visión general es la de una bóveda cilíndrica de directriz parabólica. Pero al sustituir el cilindro por dos *hypars* paralelos, se produce en la bóveda esa sutil curvatura longitudinal y ese pliegue central que no sólo rigidizan estructuralmente la pared, sino que la confieren una percepción nueva. Candela no repitió esta forma, pero yo creo que aquí empezó su interés por jugar buscando formas sensibles nuevas, y diferentes entre sí, a partir de una única forma geométrica. Quizá su hallazgo más conocido es el "paraguas", formado por cuatro paraboloides (F. 11), transmitiendo sus cargas a una columna central. La gran economía de estos paraguas hizo que Candela recibiese multitud de encargos para cubrir naves con esta estructura (F. 12). Ello le llevó a buscar variantes, como inclinarlos a modo de diente de sierra (F. 13), hacerlos disimétricos (F. 14), o invertirlos. La forma sensible de estas estructuras está muy marcada por las aristas rectas y por el encofrado, que tambien resalta las generatrices rectas; sus formas curvas quedan poco visibles. En un intento de generar iluminación natural distribuida en una fábrica textil, se introdujeron en la cubierta unas losetas de vidrio (F. 15). Aunque esta solución no volvió a utilizarse por problemas técnicos, estas losetas, al estar dispuestas según las diagonales de los hiperboloides, proporcionan una referencia visual más clara de las curvaturas de las superficies que estamos observando. Pero, en cualquier caso, y a mi modo de ver, estas cubiertas producen la sensación de algo duro y con aristas rectas. Es interesante observar el rotundo cambio que se produce en la Iglesia de la Medalla Milagrosa (F. 16). A pesar de estar formada por los mismos paraguas, aunque inclinados y deformados (F. 17), las aristas, casi más resaltadas que antes, dejan paso a unas superficies curvas claramente percibidas (F. 18) y que en conjunto generan un espacio sensible claramente diferente y sobrecogedor.

Pero si diferentes en su forma sensible, aunque iguales en la geométrica, son las estructuras antes comentadas, más difrentes aunque iguales son las estructuras con bordes curvos que Candela se atrevió a construir. En particular, son de destacar la Capilla de Lomas de Cuernavaca (F. 19) y sus bóvedas por arista. El paraboloide de Cuernavaca, en realidad, es lo más parecido a uno de los dos módulos del Pabellón de Rayos Cósmicos, salvando las diferencias de escala y el esta-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



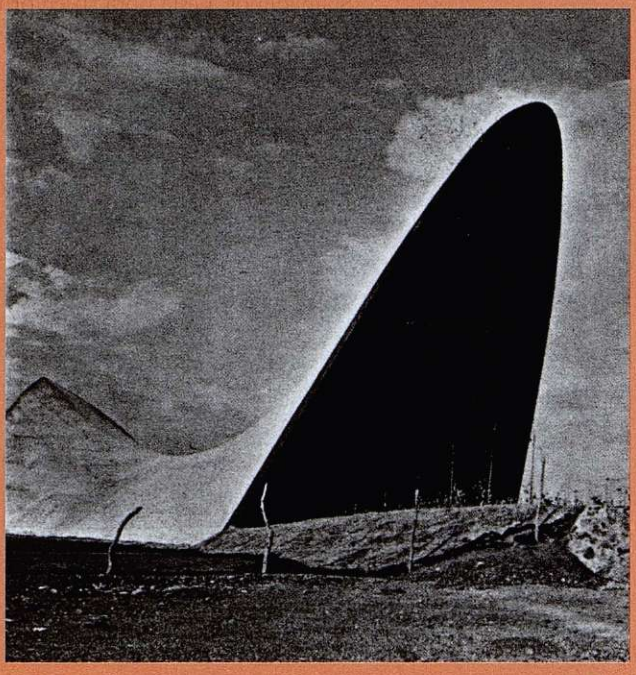
(F. 16)



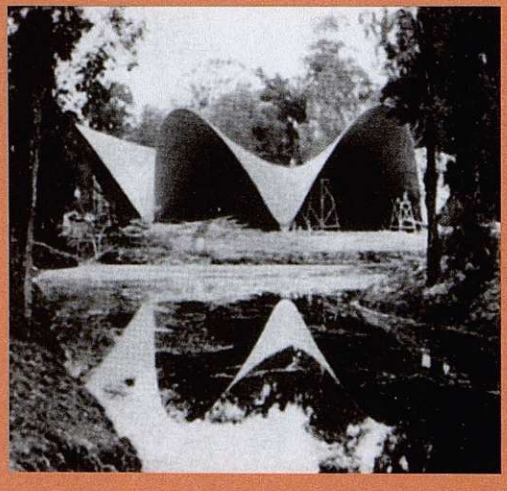
(F. 17)



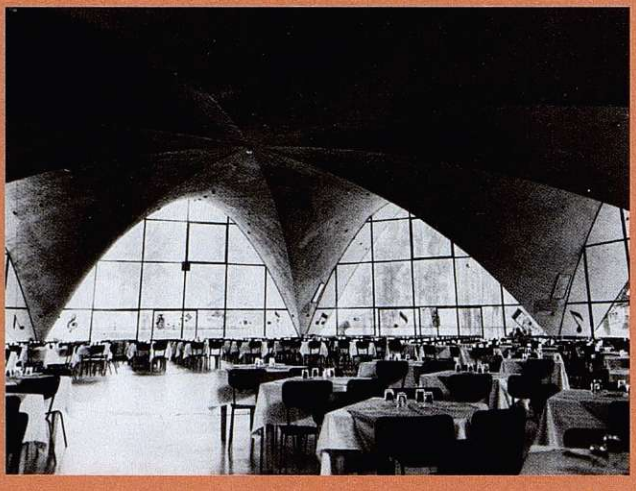
(F. 18)



(F. 19)



(F. 20)



(F. 21)

(F. 16, 18)
Iglesia de la Medalla Milagrosa
(F. 17)
Esquema de generación de la cubierta de la Iglesia

(F. 19)
Capilla de Lomas de Cuernavaca
(F. 20, 21)
Restaurante Los Manantiales de Xochimilco

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

blecimiento del borde libre curvo y volado. Y aquí, como allí, no se ve ninguna recta o arista que pueda sugerir al no iniciado que la superficie está formada por rectas. Su forma sensible es lo más alejado de un paraguas. Por otra parte, Candela construyó muchas bóvedas por arista, con diferentes plantas que van de la triangular a la octogonal, pero todas ellas obtenidas por la intersección de paraboloides hiperbólicos. De ellas, las más importantes, en cuanto a sus dimensiones, son las tres de planta cuadrada que cubren la nave de Bacardí, al norte de México D.F. Pero indudablemente, la que le ha proporcionado un mayor reconocimiento como creador de formas es el Restaurante Los Manatiales en Xochimilco (F. 20). Su cubierta está formada por una bóveda por arista de planta octogonal, formada por la intersección de cuatro paraboloides, cuyos parámetros fueron exquisitamente elegidos para conseguir una forma al mismo tiempo resistente y cautivadora. Al contrario que en Cuernavaca, aquí sí que existen aristas, pero éstas no son rectas sino curvas en forma de arcos. Todo aquí son curvas, y curvas bien perceptibles. Si añadimos a esta obra su entorno lujuriante de los canales de Xochimilco, es dificil encontrar otra que transmita una mayor sensación de relajada voluptuosidad (F. 21).

En definitiva, Candela fue un constructor de láminas que creó su empresa para tener la libertad de desarrollar sus propias ideas, al igual que lo hiciera Nervi. Pero lo hizo en un contexto tecnológico mucho más pobre, tanto en medios de ejecución como de análisis estructural. Esto le llevó a buscar formas sencillas de calcular y de construir: y encontró el *hypar*, que ademas le condujo a construir láminas que no necesitaban nervaduras ni por razón resistente ni constructiva. En este aspecto, Candela se parece a Torroja: sus superficies son lisas y desnudas, mostrándose al exterior sin necesidad de ayudas formales. Por otra parte, si las formas sensibles de Torroja son diferentes porque las geométricas también lo son, y las de Nervi son parecidas cuando utiliza la misma geometría, Candela es un maestro en conseguir formas sensibles diferentes a partir de la misma forma geométrica. No creo que haya existido nigún constructor de láminas que se haya obsesionado tanto con un elemento geométrico único y que haya sido capaz, al mismo tiempo, de ofrecernos tal variedad de formas sensibles verdaderamente atrayentes.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



4 GEOMETRÍA
GEOMETRY

La geometría inteligente
CARMEN GARCÍA REIG

Fábrica High Life
Coyoacán, México D.F., 1954

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

La geometría inteligente

Carmen García Reig

Dr. Arquitecto. Profesora Titular del Departamento de Ideación Gráfica
Escuela Técnica Superior de Arquitectura ETSAM
Universidad Politécnica de Madrid UPM, España

"Descubrir es destapar lo que está oculto a nuestros ojos y a nuestro entendimiento;
es darnos cuenta de lo que nos rodea y de lo que hay dentro de nosotros".

Félix Candela [1, p.27]

Félix Candela, guiado por los dos principios básicos en las estructuras: la estática y la geometría, se concentró en el uso constructivo de las formas geométricas. Construyó bóvedas cilíndricas, prismáticas, onduladas, conos, conoides y cúpulas, toda una amplia gama de formas de simple y doble curvatura. Entre las superficies alabeadas, por sus cualidades estructurales y la facilidad de encofrado y cimbra, eligió las superficies regladas, y por la relativa facilidad de cálculo escogió las de ecuación de segundo grado. Hay dos superficies cuádricas que cumplen las dos propiedades enunciadas: el hiperboloide hiperbólico y el paraboloide hiperbólico. Optó por el paraboloide, el cual ofrece la ventaja de inscribirse en un cuadrilátero formado por cuatro bordes rectos, en el que la distancia de los apoyos de las generatrices sobre las directrices es proporcional y facilita su disposición respecto al hiperboloide donde no se guarda la proporcionalidad.

El uso extensivo de lo que se convino llamar "paraguas" fue una de sus mayores aportaciones: composición formada por cuatro tímpanos con forma de paraboloide hiperbólico y sostenido por un soporte central.

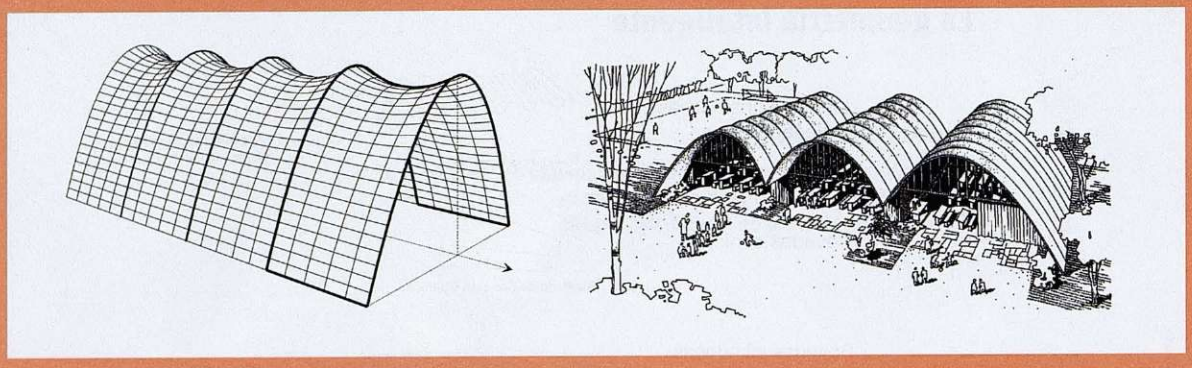
El primer "cascarón"[1] experimental fue una bóveda funicular con directriz catenaria para una escuela rural en Tamaulipas (F. 2).

Construye la segunda lámina experimental en los terrenos de la Fábrica de Celestino Fernández, en San Bartolo, con una bóveda conoidal de 15x6m con un espesor de 3cm (F. 3).

El conoide es una superficie reglada de plano director, generada por una recta que se desliza apoyando un extremo en una curva plana y el otro en una recta. Según el tipo de curva que sirva de directriz, el conoide será circular, elíptico o parabólico. Candela lo proyecta con directriz cónica de tipo parábola, pero no toma la directriz recta del conoide como apoyo, sino que lo construye sobre dos arcos de peralte distinto: uno de ellos muy rebajado, de forma que el tirante queda absorbido visualmente. Crea unas aberturas en media luna, a modo de dientes de sierra, muy apropiadas para la entrada de la iluminación natural.

[1] Cascarón (*shell estructures*): aquellas estructuras curvas laminares que son capaces de trabajar, en condiciones normales de carga, con esfuerzos solamente de membrana es decir, sin que se produzcan flexiones de la lámina.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 2)



(F. 3)

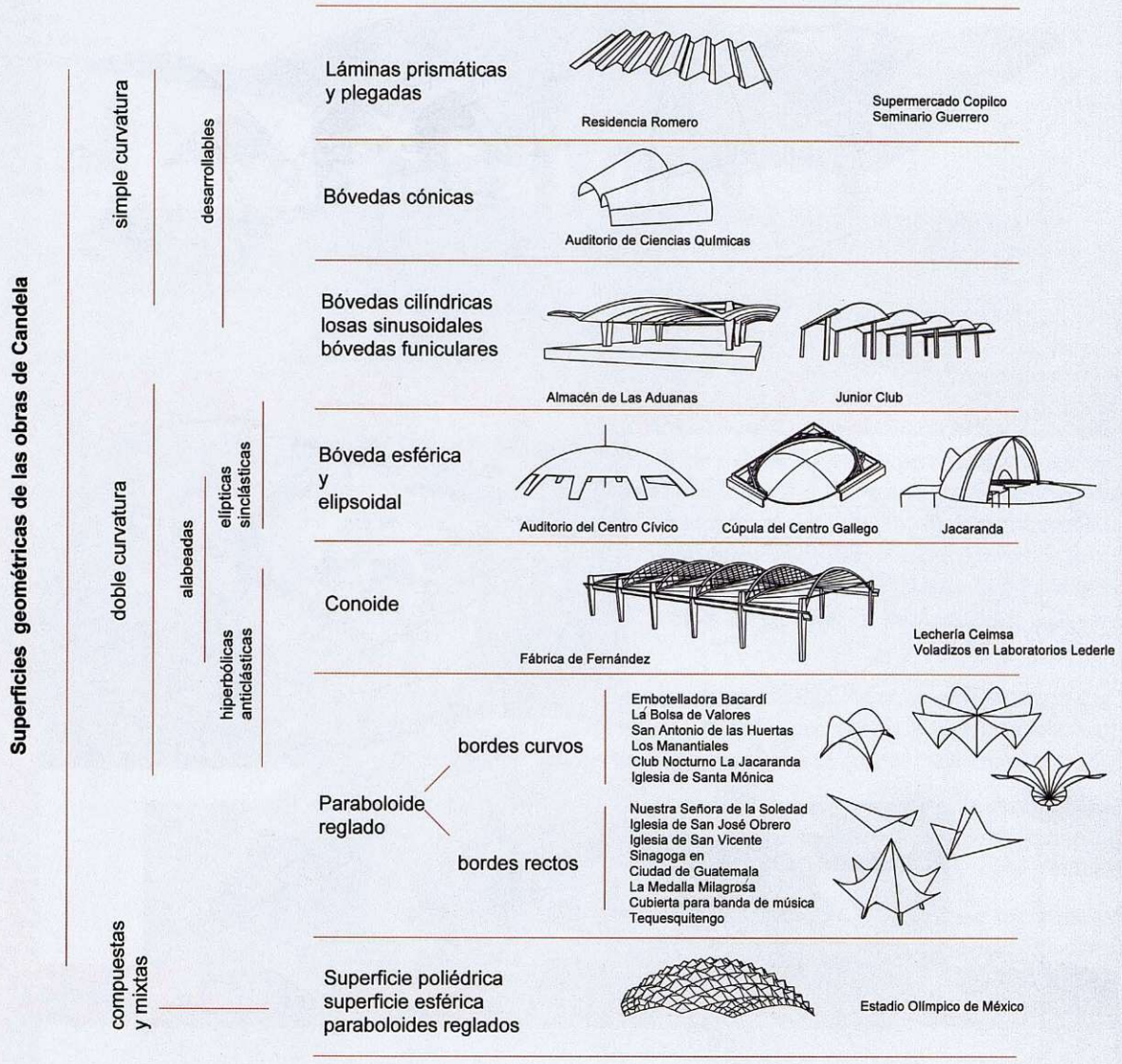
(F. 2)

Escuela rural en Tamaulipas
Bóveda funicular

(F. 3)

Fábrica de Celestino Fernández
El conoide con el trazado de generatrices y porción elegida de la superficie
Perspectivas de la asociación constructiva de los conoides en la cubierta

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 1)

Tabla descriptora de las superficies usadas por Candela en los casos estudiados en este artículo

En la Residencia Romero tuvo otra oportunidad de hacer una losa sinusoidal y en Los jardines del Pedregal una losa plegada. En el Júnior Club construyó una losa ondulada de muy pocos centímetros de espesor formada por cinco bóvedas cilíndricas.

La cubierta del Almacén de Las Aduanas tiene una bóveda central cilíndrica de directriz antifunicular de 20m de luz y 4cm de espesor, y otras laterales de 6m de luz y 5cm de espesor (F. 4).

En el Auditorio del Centro Cívico en Ciudad Sahagún cubre el auditorio con un casquete esférico de 7m de flecha determinado por una esfera de 21m de radio (F. 5).

Para la cúpula elipsoidal del Centro Gallego secciona una cuádrica elíptica por un plano horizontal para definir la elipse inscrita en el rectángulo a cubrir (F. 6).

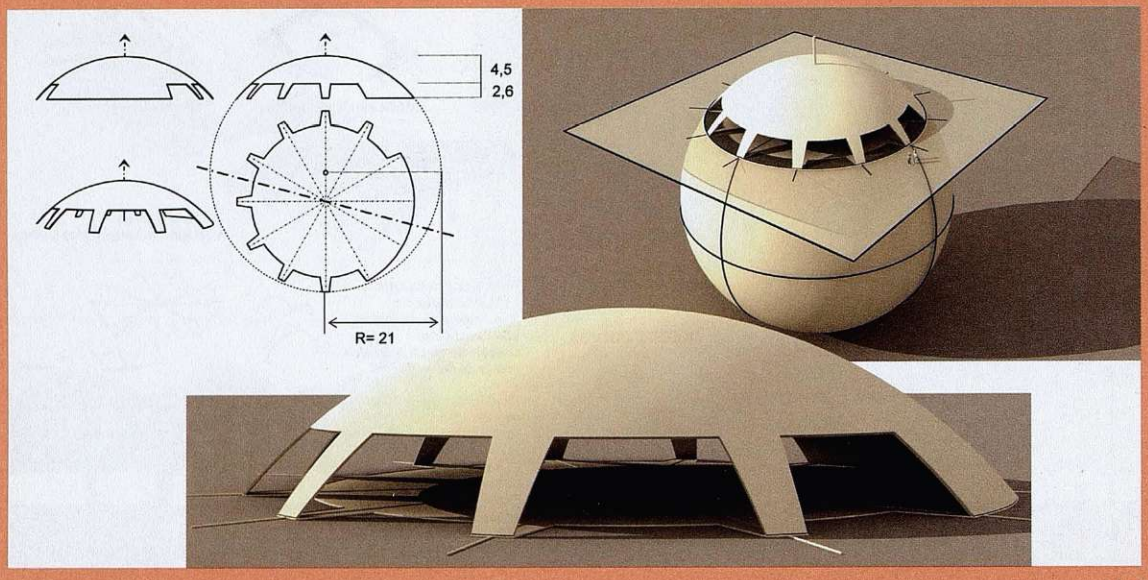
Candela es conocido por la creación de estructuras basadas en el uso extensivo del paraboloide hiperbólico; en el resto de este estudio analizaremos la aplicación que en su obra hace de esta superficie.

El paraboloide hiperbólico pertenece al grupo de las superficies de segundo grado llamadas cuádricas; además de contar con sus propiedades geométricas, tiene la particularidad de admitir en cada uno de todos sus puntos un plano tangente que corta a la superficie según dos rectas, generatriz y directriz, que tienen en común con la superficie el punto de tangencia.

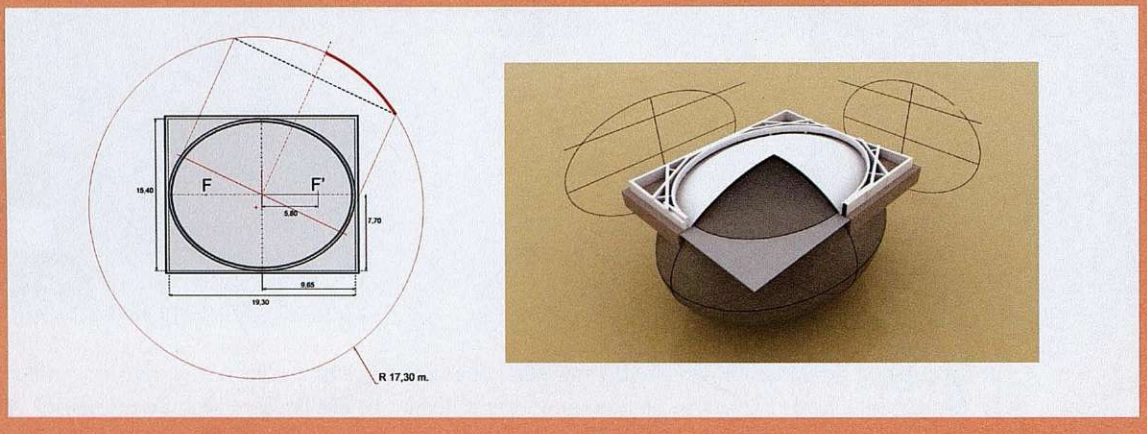
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 4)



(F. 5)



(F. 6)

(F. 4)

Vista general de la cubierta de Las Aduanas
Los pilares, tirantes superiores y voladizos laterales proporcionan ligereza a la estructura

(F. 5)

Auditorio del Centro Cívico en Ciudad Sahagún
Alzado, planta y perspectivas del casquete esférico

(F. 6)

Centro Gallego
Planta, sección y perspectiva del elipsoide, forma base del diseño de la cúpula elíptica

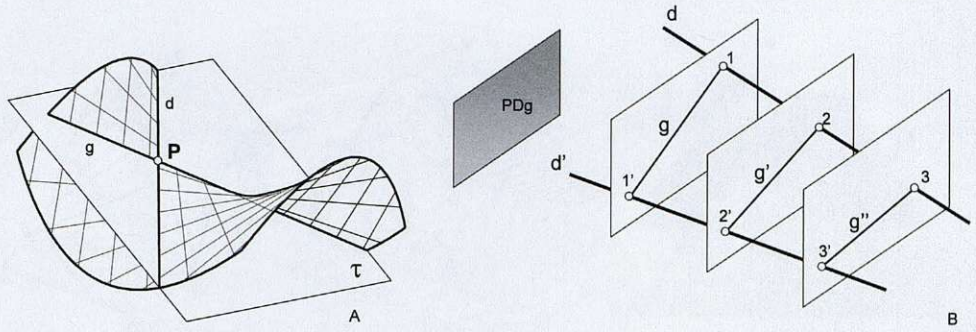
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 7 a)

Determinación del plano tangente en un punto P de la superficie con la generatriz y directriz de corte

(F. 7 b)

Generación del paraboloide hiperbólico como haz alabeado. Obtención de generatrices



Incluidos en las superficies cuádricas, el hiperboloide y el paraboloide hiperbólicos, son además cuádricas regladas por la propiedad de contener dos sistemas o familias de rectas –generatrices y directrices– que se apoyan de forma ordenada sobre la cuádrica. El paraboloide hiperbólico o reglado se genera por una recta, generatriz, que se mueve apoyándose sobre dos rectas, directrices, manteniéndose paralela a un plano dado, plano director. El plano director es el lugar geométrico de las paralelas a las generatrices y directrices del paraboloide trazadas desde cualquier punto del espacio.

En la (F. 7 b), las directrices rectilíneas d y d' se cruzan y cortan a todas las generatrices g, g', g'' en puntos 1, 2, 3... y 1', 2', 3'..., puntos homólogos de series proyectivas que en el paraboloide hiperbólico son series semejantes (proporcionales) cuyas bases se cruzan en el espacio.

Conocidas dos rectas directrices y el plano director del sistema de generatrices, basta con trazar una serie de planos paralelos al director para obtener puntos de intersección con las directrices, los cuales nos determinan las generatrices rectilíneas del otro sistema reglado.

El paraboloide hiperbólico puede ser considerado tanto superficie reglada como superficie de traslación. Si cualquier superficie de traslación se obtiene al desplazar paralelamente a sí misma una generatriz a lo largo de una directriz, el paraboloide hiperbólico se genera por el deslizamiento continuo y paralelo de una parábola sobre otra de curvatura opuesta.

(F. 8 a)

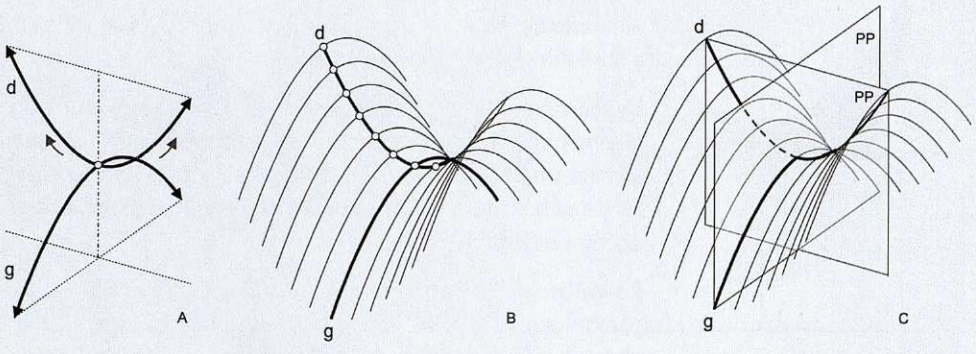
Dos parábolas ortogonales

(F. 8 b)

Traslación de la generatriz a lo largo de la directriz

(F. 8 c)

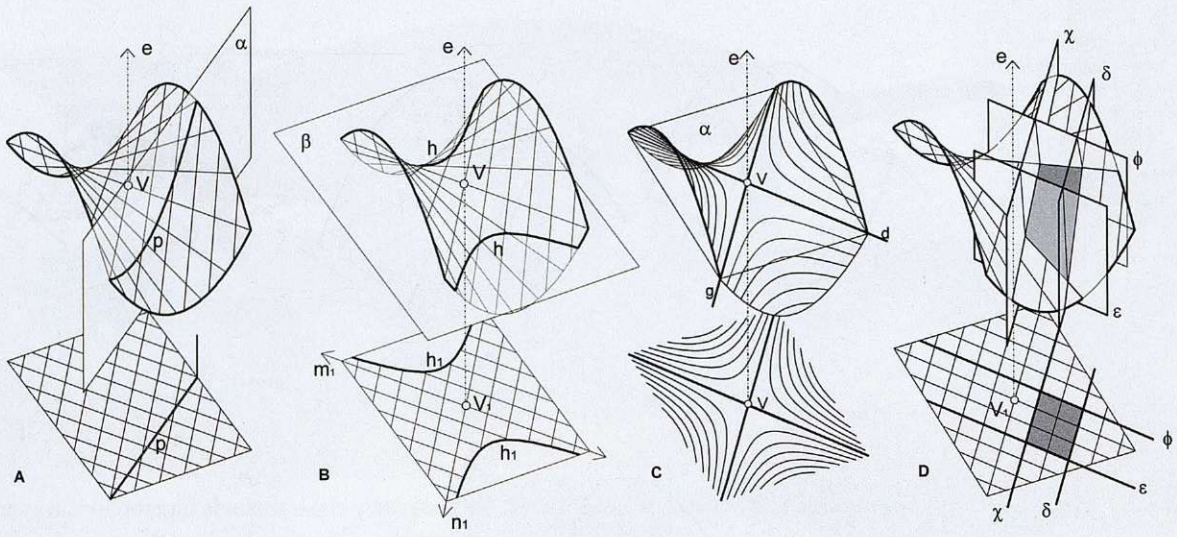
Planos ortogonales que contienen a cada parábola



La superficie del paraboloide es infinita, se extiende como un manto por el espacio geométrico dividiéndolo en dos, de forma que para recorrer su haz y envés hay que atravesarlo irremediablemente. Usualmente cortamos la cuádrica por planos y estudiamos una fracción superficial que puede dar aspectos muy diversos dependiendo de las condiciones que se impongan a los bordes. Así, la determinación del tipo de sección plana que admite la cuádrica nos permite conocer las distintas definiciones y porciones de superficie que ha utilizado Félix Candela en sus proyectos y construcciones.

Si la sección plana a una cuádrica es siempre una línea cónica, en el caso del paraboloide hiperbólico, que no admite elipses, las secciones son siempre parábolas, hipérbolas o sus cónicas

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 9 a)

Sección parábola por plano paralelo al eje de la cuádrica

(F. 9 b)

Sección hipérbola por plano oblicuo respecto al eje

(F. 9 c)

Secciones por una serie de planos equidistantes y normales al eje: distribución de las hipérbolas sobre la superficie y las dos rectas o cónicas degeneradas en el vértice

(F. 9 d)

Sección por cuatro planos, dos a dos paralelos a los planos directores donde la curva intersección en los cuatro casos es recta

degeneradas (una o dos rectas). Si el plano cortante es paralelo o contiene al eje del paraboloide (F. 9 a), la curva sección es una parábola. Si además este plano es paralelo a cualquiera de los planos directores (F. 9 d), la curva intersección es una recta (cónica degenerada: generatriz o directriz, según el plano director). Si el plano cortante es oblicuo respecto al eje del paraboloide (F. 9 b), la curva intersección es una hipérbola. Si además este plano pasa por el vértice y es perpendicular al eje del paraboloide, la intersección son dos rectas (F. 9 c).

Analizamos varias obras basadas en la geometría del paraboloide hiperbólico proyectadas y construidas por Candela. Se distinguen entre las limitadas por bordes curvos y aquéllas otras que lo están por bordes rectos.

Bóvedas con bordes curvos

La primera obra resuelta con paraboloide reglado[2] es el Pabellón de Rayos Cósmicos en la Ciudad Universitaria en México D.F., un laboratorio especializado en la medición de neutrones.

La cubierta no debía sobrepasar los 15mm de espesor, lo que determinó que Candela usara una bóveda de doble curvatura en lugar de la bóveda cilíndrica propuesta inicialmente. Proyectó un paraboloide debido a la capacidad de esta superficie en mantener la rigidez necesitada gracias a su doble sistema rectilíneo (F. 10).

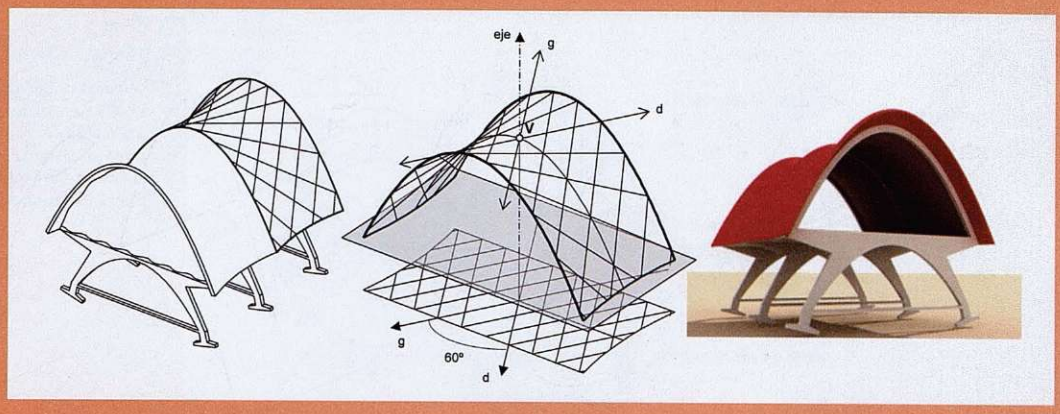
La solución final son dos paraboloides hiperbólicos acoplados a lo largo de una parábola. Los planos directores son verticales, al igual que el eje, y los sistemas de generatrices y directrices forman un ángulo de 60°. La planta mide 12x10,75m La cubierta está limitada por las parábolas de embocadura y la sección por el plano horizontal a nivel del forjado que provoca un corte del tipo hipérbola.

En las Lomas de Cuernavaca, en Morelos, construye la Capilla abierta de Palmira con un único paraboloide, el cual secciona por varios planos hasta darle la forma definitiva mostrando así el esplendor de la delgada lámina hiperbólica (F. 11, 12).

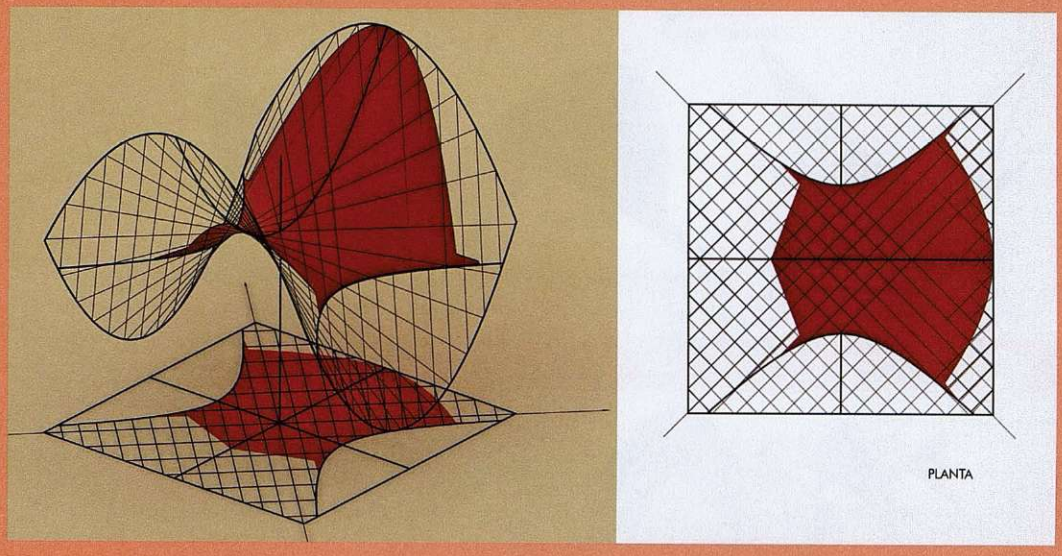
Candela proyecta la cuádrica reglada con el eje vertical, y parte de la descripción gráfica más conocida: paraboloide en "silla de montar" limitado en planta por un cuadrado de 36,89m y parábolas principales de igual curvatura, distinto signo y normales entre sí. Las diagonales del cuadrado muestran la dirección de los planos directores del sistema rectilíneo de generatrices y directrices obteniendo un paraboloide equilátero.

[2] Fue la primera vez que Candela aplicó una solución a base de paraboloides hiperbólicos, una forma geométrica que el arquitecto había estudiado en el tratado publicado en 1936 por F. Aimond "Étude statique des voiles minces en paraboloide hyperbolique travaillant sans flexion" durante sus estudios de arquitectura en Madrid [3, p.91].

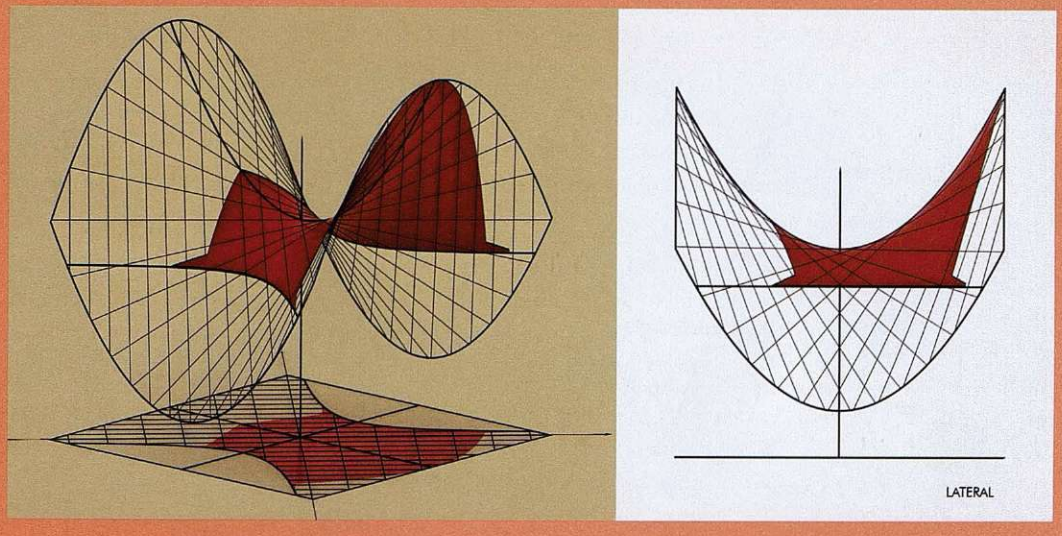
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 10)



(F. 11)



(F. 12)

(F. 10)

Geometría del Pabellón de Rayos Cósmicos con el trazado de las generatrices y directrices

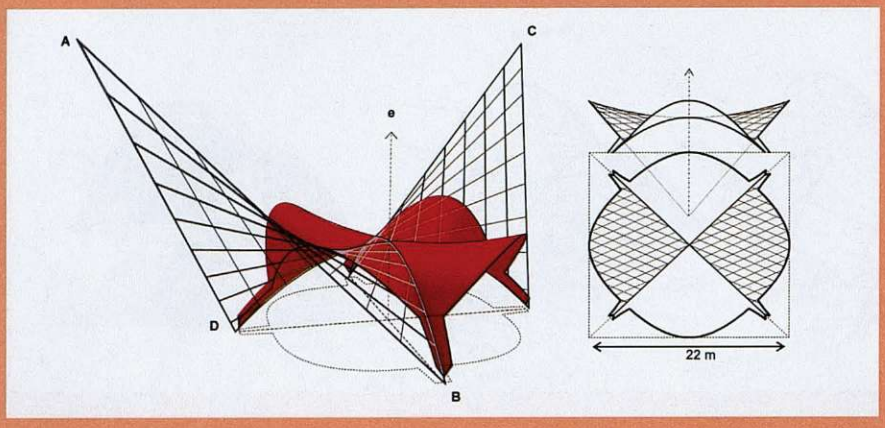
(F. 11)

Capilla abierta de Palmira. Planta, axonometría de la cuádrica reglada original con el trazado de generatrices, directrices y porción de superficie edificada

(F. 12)

Capilla abierta de Palmira. Alzado lateral y axonometría de la cuádrica reglada original con el trazado de generatrices y directrices y la porción de superficie edificada

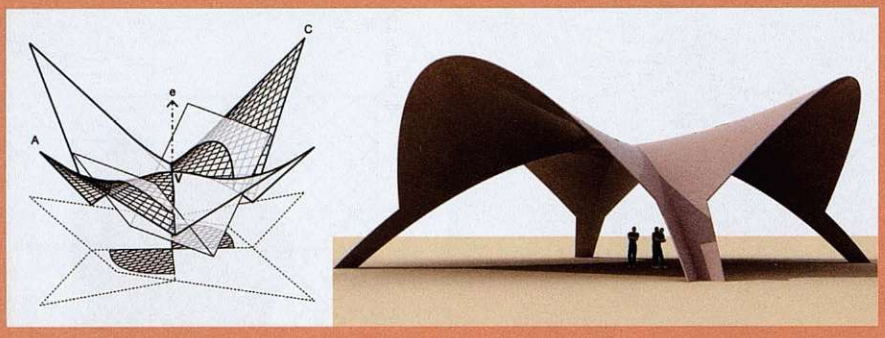
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 14)

Oficina de Ventas

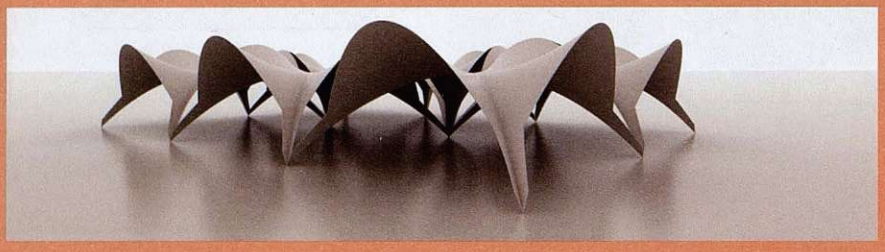
Perspectiva de la bóveda y un cuadrilátero alabeado con el trazado de las generatrices y directrices rectilíneas
Proyecciones ortogonales: alzado, planta y axonometría



(F. 15)

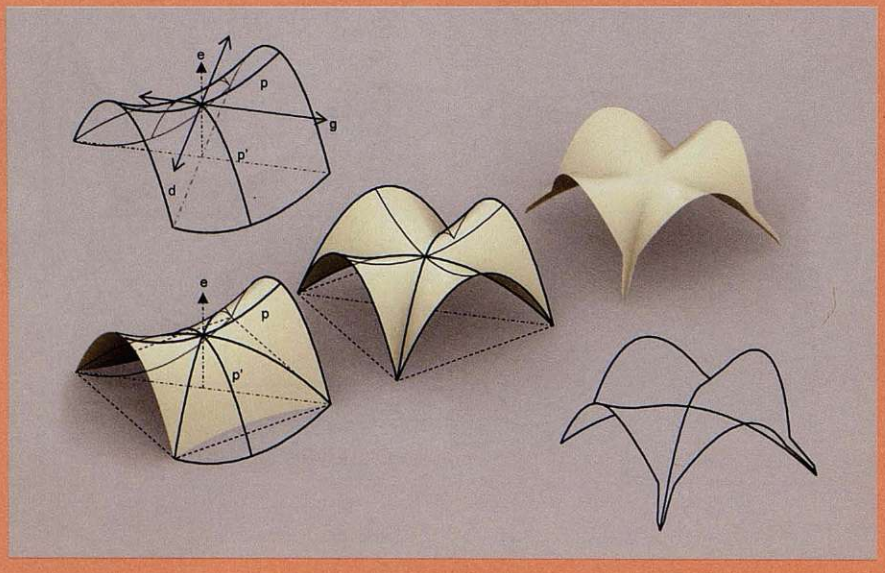
Oficina de Ventas

Axonometría de los paraboloides y planos que cortan según hipérbolas que generan los bordes curvos
Vista en perspectiva cónica en la que se visualizan los apoyos y las aristas en parábola interiores



(F. 16)

Embotelladora de Bacardí
Conjunto de las seis bóvedas



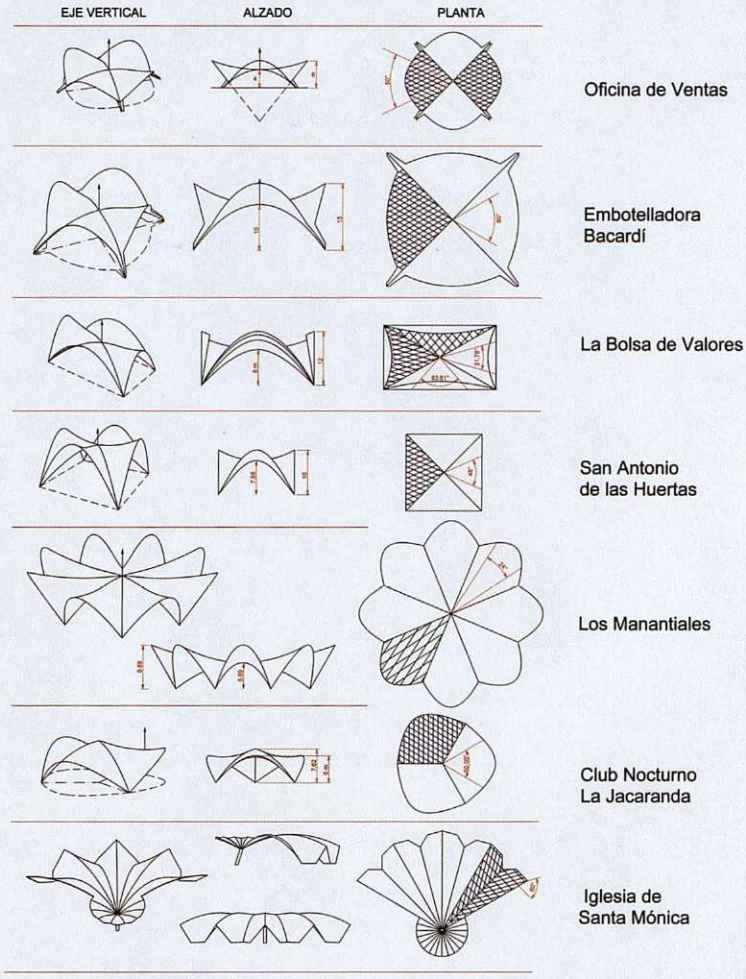
(F. 17)

Embotelladora de Bacardí
Esquema del proceso de composición de una de las bóvedas; en este caso por medio de dos paraboloides hiperbólicos idénticos

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 13)

Bóvedas por arista. Se han analizado geométricamente siete de las obras obteniendo los elementos que definen a cada bóveda. Las plantas y alzados mantienen las proporciones siendo la escala gráfica la misma en todos los casos



El vértice del paraboloide a sólo una cota de 4,14m es el punto más bajo de la bóveda. Situándose debajo de él en el interior de la capilla, el observador experimenta visualmente la potente fuerza de la cubierta abriéndose hacia el exterior.

Bóvedas por arista

Si tradicionalmente la bóveda por arista se construye a partir de bóvedas de cañón –los arcos perimetrales son arcos de circunferencia–, Félix Candela utiliza el paraboloide hiperbólico con las embocaduras curvas obteniendo un diseño sencillo y equilibrado cuando asocia cuatro o más lóbulos obtenidos por la intersección entre cuádricas. Edifica varias obras con esta solución estructural, ya que conoce y maneja con total soltura el cálculo estructural de esta asociación de lóbulos de paraboloide[3]. Levanta una bóveda aislada en la Oficina de Ventas en Guadalajara y otra en la Bolsa de México, tres en la iglesia de San Antonio de las Huertas y seis en la Embotelladora Bacardí. El número de aristas también varía: en los casos nombrados anteriormente utiliza cuatro, en el Club nocturno La Jacaranda tres, pero en Los Manantiales ocho, e incluso construye en Cuernavaca, en el Hotel Casino de La Selva y para cubrir un auditorio, una bóveda de cinco aristas.

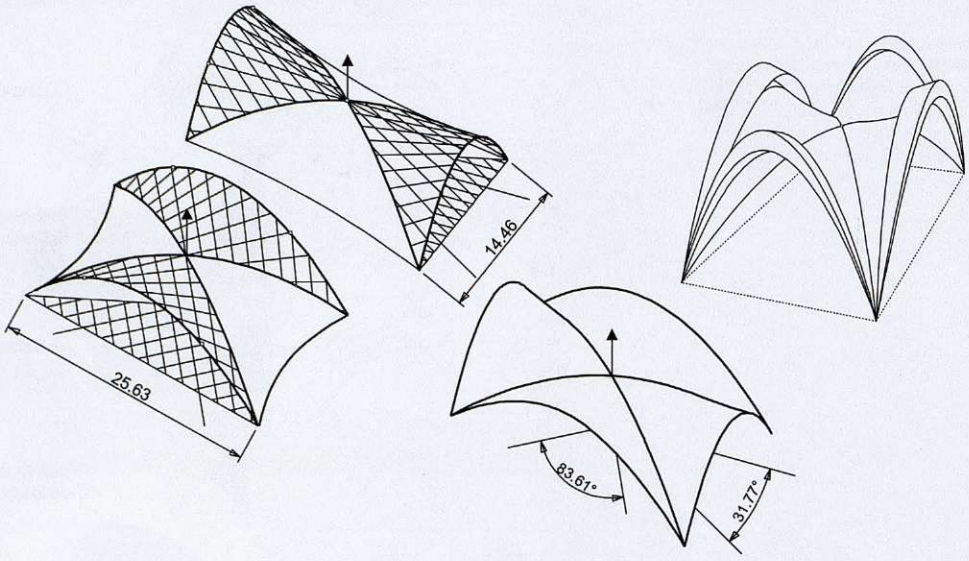
Para la Oficina de Ventas en la ciudad de Guadalajara en Jalisco interseccciona dos paraboloides hiperbólicos de eje vertical creando una bóveda abierta por cuatro lados. Posa la estructura sobre cuatro apoyos generados por la extensión de la superficie y la arista interior (F. 14, 15).

[3] Gracias a la sencillez de la fórmula del *hypar* (*hiperbolic paraboloid*), la capacidad del cascarón para trabajar sin esfuerzos de borde pudo expresarse matemáticamente con relativa facilidad. Los esfuerzos de borde indeseables se transfieren a las aristas mediante las generatrices. Puesto que la estructura es simétrica, las fuerzas resultantes quedan en el plano de las aristas que trabajan como arcos de tres articulaciones [3, p.218].

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 18)

Sala de Remates de la Bolsa de Valores



El ángulo entre generatriz y directriz en el vértice es muy próximo a 50°, lo que significa que la planta del cuadrilátero básico es romboidal. Los bordes curvos son hipérbolas que se obtienen por el corte de un plano oblicuo inclinado más de 45° respecto a la horizontal. El vértice está a una cota de 4m y el punto más alto del borde a 6m.

En la Embotelladora de Bacardí al norte de la Ciudad de México construye seis bóvedas de planta cuadrada de 30m de lado y un espesor constante de 4cm (F. 16, 17).

Recorta la superficie con planos oblicuos obteniendo cuatro bordes curvos en hipérbola. Dispone las seis[4] bóvedas en doble hilera dejando entre ellas unos intersticios que favorecen la entrada de iluminación natural, y eleva todo el conjunto con unos apoyos que siguen fielmente la guía de las curvas de las aristas, fruto éstas de la intersección ortogonal de las dos cuádricas.

En la Sala de Remates de la Bolsa de Valores, que se encuentra en la tercera planta de un edificio de seis, la planta es rectangular y se plantea otra cuestión: las cuádricas son distintas para poder cubrir la planta de 14,46x25,63m. Las aristas siguen siendo curvas planas intersección de las dos cuádricas: dos cónicas del tipo parábola con eje coincidente con las superficies regladas. Los planos directores de cada paraboloide son distintos y guardan ángulos de 83,61° y 31,77° respectivamente (F. 18).

Para proporcionar luz al interior de la sala, se limitan los paraboloides por planos oblicuos que dejan unas entradas de luz en media luna iluminando el paramento interior.

En San Antonio de las Huertas se proyectan tres bóvedas por arista alineadas con arcos cilíndricos parabólicos. Éste es uno de los casos en los que los bordes son parábolas producto del corte del paraboloide por planos verticales (F. 19).

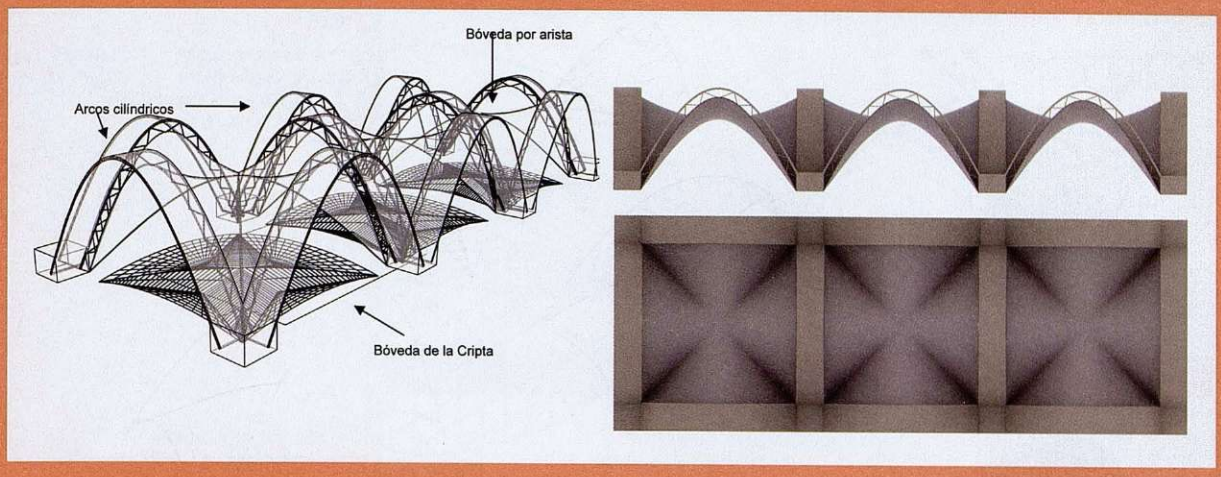
La planta de las bóvedas es cuadrada y los ejes verticales. La clave de cada bóveda se encuentra a más de 7m de cota y los puntos más altos de los bordes a 10m. Candela erige unos cilindros parabólicos de directriz paralela al borde de los paraboloides donde coloca unos lucernarios que permiten la entrada de iluminación natural.

Los paraboloides que integran cada bóveda son equiláteros, tienen planos directores ortogonales. La bóveda modula la geometría regular del conjunto. La cripta que ocupa el espacio bajo dos de las bóvedas exteriores está techada con 12 paraboloides reglados limitados por cuadriláteros alabeados que cubren un espacio diáfano sin columnas centrales.

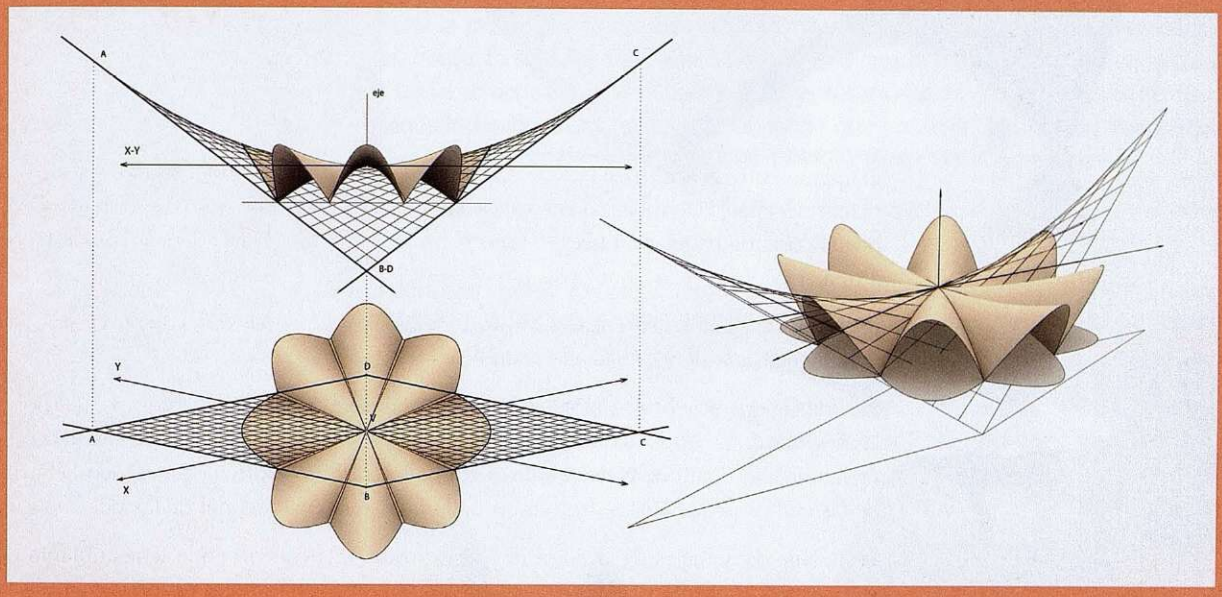
El Restaurante Los Manantiales de Xochimilco es una bóveda por arista octogonal compuesta por la intersección de cuatro paraboloides reglados idénticos (F. 20).

[4] Inicialmente sólo se construyeron tres bóvedas, añadiéndose, en una segunda fase, otras tres idénticas.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 19)



(F. 20)

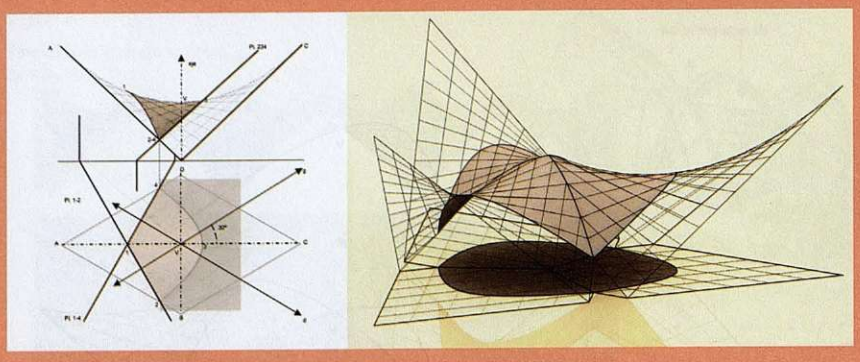
(F. 19)

San Antonio de las Huertas
Esquema general
Alzado y planta del conjunto

(F. 20)

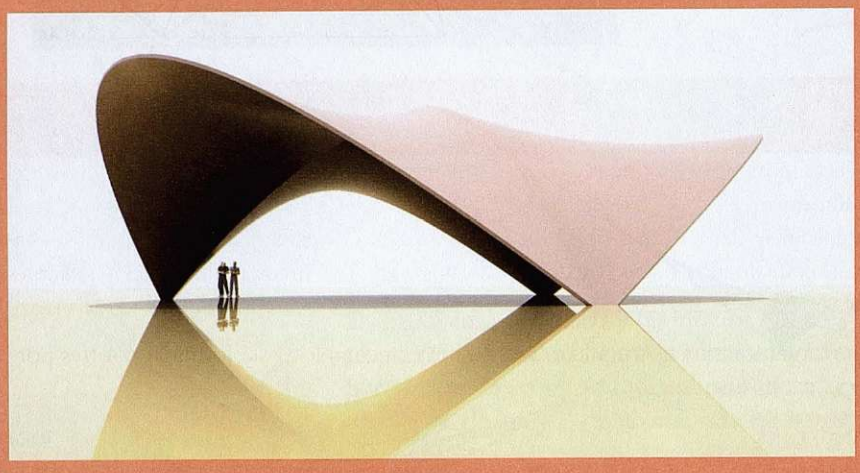
Restaurante Los Manantiales de Xochimilco
Alzado y planta del cuadrilátero alabeado considerado
Esquema en perspectiva cónica
Secciones planas

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



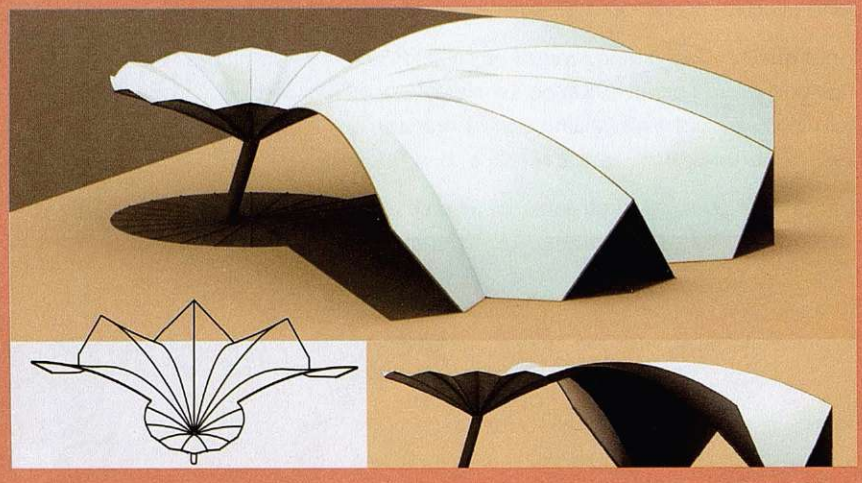
(F. 22)

Club nocturno La Jacaranda
El eje de la cuádrica es vertical
y el ángulo entre generatriz
y directriz en el vértice es 60°



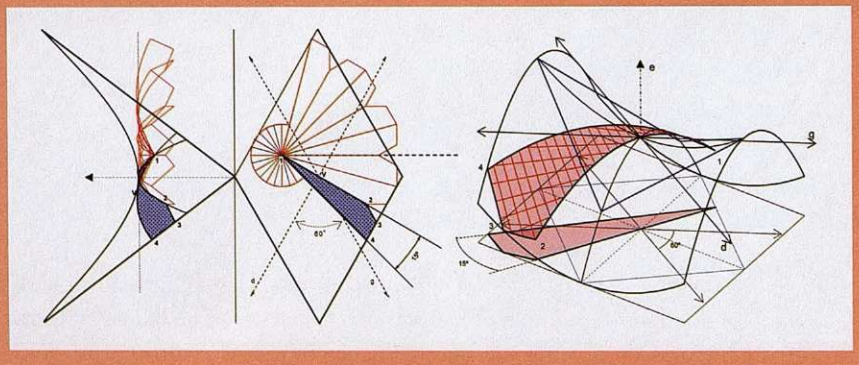
(F. 23)

Club nocturno La Jacaranda
Vista del exterior e interior
de la bóveda



(F. 24)

Iglesia de Santa Mónica
Combinación de gajos extraídos
del paraboloide reglado
Alzado lateral



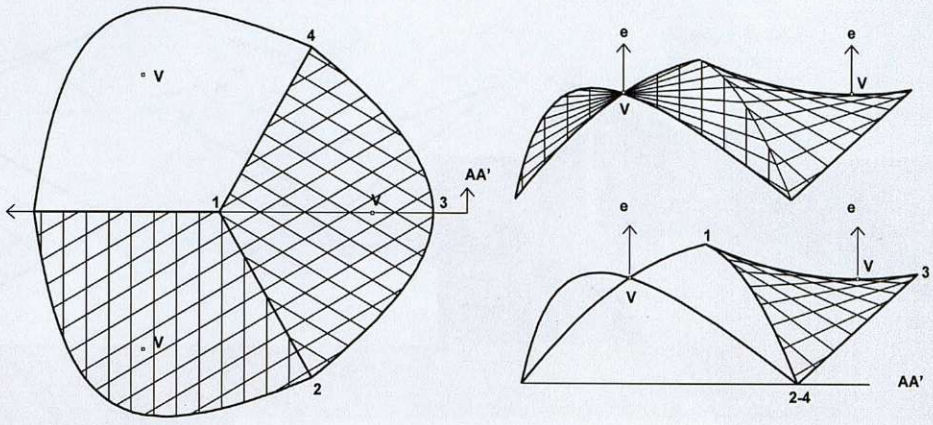
(F. 25)

Iglesia de Santa Mónica
Gajo extraído del paraboloide
en proyecciones ortogonales
Axonometría del paraboloide
con sus elementos fundamentales
y definición de la porción utilizada

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

(F. 21)

Club nocturno La Jacaranda
Planta, alzado y sección



Candela proyecta la matriz polar de cuatro paraboloides alrededor del eje vertical y vértice del cuadrilátero alabeado. La sencillez de la forma del conjunto creado por ocho lóbulos de la cuádrica reglada inicial se debe a las propiedades de la geometría elegida. Limita la superficie cortando por planos inclinados hacia el exterior, de modo que los arcos perimetrales resultantes sean hipérbolas.

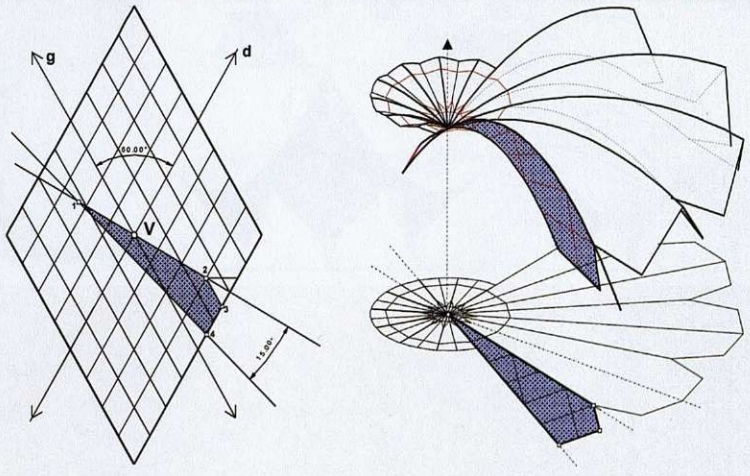
Club nocturno La Jacaranda en Acapulco, 1957. La bóveda completa está formada por tres porciones idénticas del mismo paraboloide hiperbólico (F. 22, 23).

El eje de la cuádrica es vertical y el ángulo entre generatriz y directriz en el vértice es 60°. En esta ocasión la porción de la bóveda elegida requiere que la ubicación del vértice de la superficie se desplace respecto al centro de la matriz polar de tres elementos que cubre la planta triangular.

Las tres secciones que delimitan la porción de superficie son secciones planas: 1-2 y 1-4, parábolas, secciones por planos paralelos al eje. La curva 2-3-4, solución del corte por un plano oblicuo respecto al eje es una hipérbola.

(F. 26)

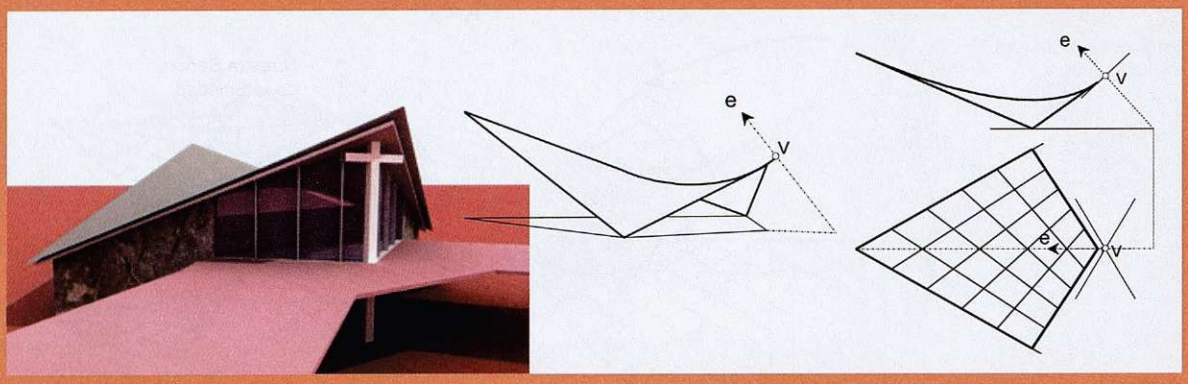
Iglesia de Santa Mónica
Planta del cuadrilátero con el vértice del paraboloide, trazado de generatrices y gajo de la superficie de puntos 1, 2, 3 y 4 que modula la bóveda. Axonometría con la matriz polar que determina la solución final



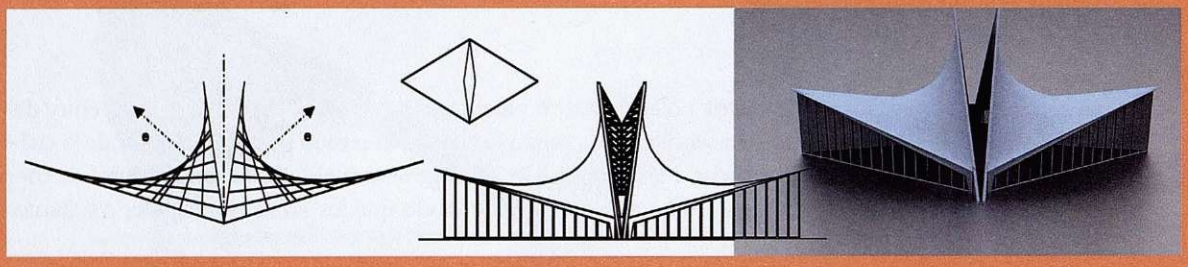
La Iglesia de Santa Mónica en San Lorenzo de Xochimancas. En esta iglesia Candela extrae del paraboloide una fracción de superficie combinando bordes rectos y curvos. La planta en forma de abanico se forma con gajos de paraboloide que se encuentran en el centro en un único soporte inclinado.

Siendo 60° el ángulo entre generatriz y directriz en el vértice, la porción de la cuádrica queda definida por las secciones de los planos verticales: 1-2, 2-3, 3-4 y 1-4 (F. 25, 26). Los planos 1-2 y 1-4, con un ángulo de 15°, determinan curvas cónicas del tipo parábola que coinciden en el punto 1 donde se traza la columna inclinada. Los planos verticales 2-3 y 3-4 son paralelos a los directores y determinan segmentos rectilíneos (cónicas degeneradas) (F. 24, 25, 26).

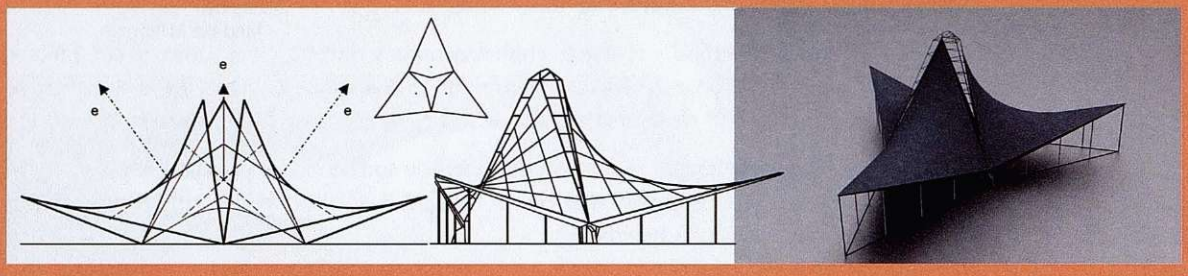
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



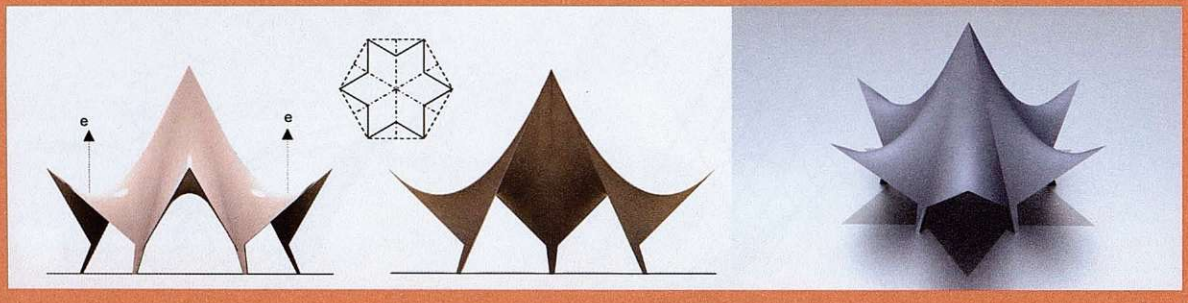
(F. 28)



(F. 29)



(F. 30)



(F. 31)

(F. 28)

Capilla de Nuestra Señora de la Soledad
Situación del vértice e inclinación del eje
del paraboloide reglado

(F. 29)

Iglesia de San José Obrero
Alzado, planta y acristalamiento

(F. 30)

Iglesia de San Vicente
Alzado, planta y vista lateral

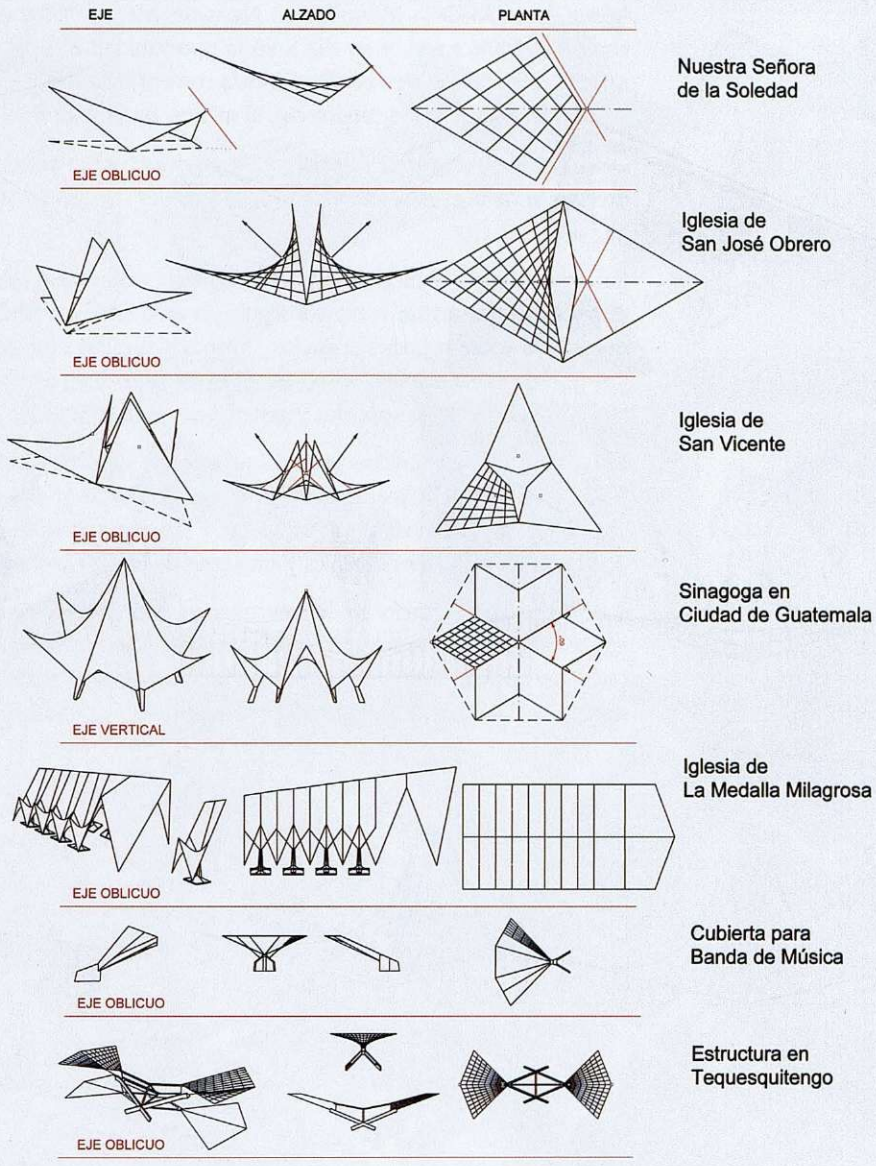
(F. 31)

Sinagoga
Alzado, planta, sección y vista de la sinagoga
de planta hexagonal

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

(F. 27)

Bóvedas y/o cubiertas limitadas por bordes rectos. Se ha analizado la geometría de siete de las obras obteniendo los elementos que definen cada bóveda. Las plantas y alzados guardan las proporciones, siendo la escala gráfica igual en todos los casos.



Bóvedas con bordes rectos

En la Capilla de Nuestra Señora de la Soledad, conocida como la Capilla del Altillo, Félix Candela proyecta un paraboloide hiperbólico limitado por un cuadrilátero alabeado cuyo eje no es vertical, el cual tiene un ángulo de algo más de 45° respecto a la horizontal. El vértice del paraboloide queda fuera de la cubierta, a un metro de ella. La planta es romboidal de 36m de longitud y 29m de ancho (F. 28).

Iglesia de San José Obrero en Monterrey, Nuevo León. Planta romboidal con dos paraboloides simétricos con ejes inclinados y una amplitud de 102° para el diedro formado por los planos directores. La cubierta deja un intersticio triangular cuando en los apoyos se conectan los paraboloides que se acristala facilitando la entrada de iluminación natural (F. 29).

Iglesia de San Vicente en Coyoacán, México D.F. Planta triangular con tres paraboloides simétricos de ejes inclinados. La inclinación de los paraboloides crea una abertura en la cubierta que se cierra con unos lucernarios realizados con perfiles metálicos que dan rigidez al conjunto. Los planos directores forman un diedro con una amplitud de 73° (F. 30).

Sinagoga en Ciudad de Guatemala. Planta hexagonal estrellada formada por seis rombos que determinan la proyectación de los paraboloides hiperbólicos de eje vertical limitados por cuadriláteros alabeados con vértices a distinta cota (F. 31).

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Iglesia de La Medalla Milagrosa en Narvarte, México D.F. Ésta es la única obra que él mismo consideró 100% suya[5], y en ella tuvo la oportunidad de aplicar sus ideas sobre cubiertas ligeras en un templo. Acerca de ello Candela comentó: "la mejor oportunidad que puede concederse a un arquitecto para que intente, al menos, hacer algo trascendente"[6].

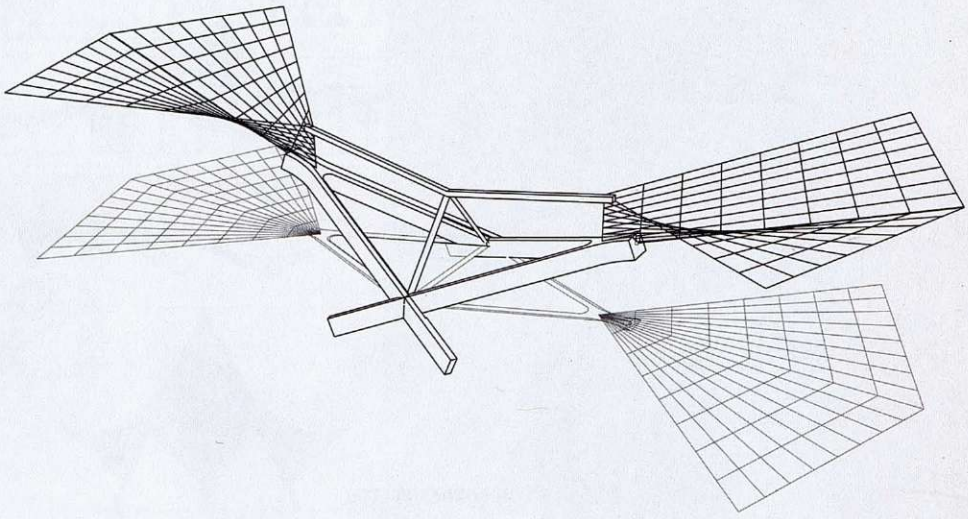
Diseña una estructura espectacular e innovadora combinando superficies alabeadas: todas ellas, excepto la de la capilla lateral, son paraboloides con el espesor usual de 4cm o menos (F. 32, 33, 34).

Candela consigue el módulo estructural básico volcando el "paraguas" formado por paraboloides, y eleva dos aristas hasta conseguir un arco en V invertida que trabaja individualmente y que apoya sobre soportes aristados -formas alabeadas diseñadas intuitivamente según las cargas que deben transmitir- prescindiendo de capiteles. Las superficies alabeadas emergen casi tangenciales desde los soportes y generan un espacio interior aristado.

La planta sigue una distribución clásica: líneas de soportes a ambos lados del eje de la nave central la conectan visualmente con las naves laterales formadas por el pliegue y elevación de los cuadriláteros alabeados. La capilla lateral se resuelve con una retícula de cuadriláteros alabeados que crean limatesas horizontales y una serie de limahoyas que se canalizan por los apoyos.

Estructura para anuncio en Tequesquitengo, Morelos. Construye una estructura metálica que soporta dos voladizos simétricos de hormigón. Con planta triangular, vuelve a situar una generatriz horizontal y otra vertical para definir cada paraboloide reglado. En este caso los apoyos siguen las directrices estructurales para soportar en equilibrio el conjunto.

(F. 36)
Perspectiva de la estructura de Tequesquitengo



Cubierta para Banda de Música en Santa Fe. La construcción es un gran voladizo sujeto por una generatriz vertical que se arriostra en dos pequeños muros de hormigón anclados al suelo para evitar el vuelco.

La superficie es un cuadrilátero alabeado definido por las dos aristas: una vertical y otra horizontal. La cubierta está formada por tres piezas iguales y cada una cubre un área triangular con el vértice en el apoyo y la base de 6,4m a una distancia de 12m La envergadura total de la marquesina es de 12,5m (F. 35).

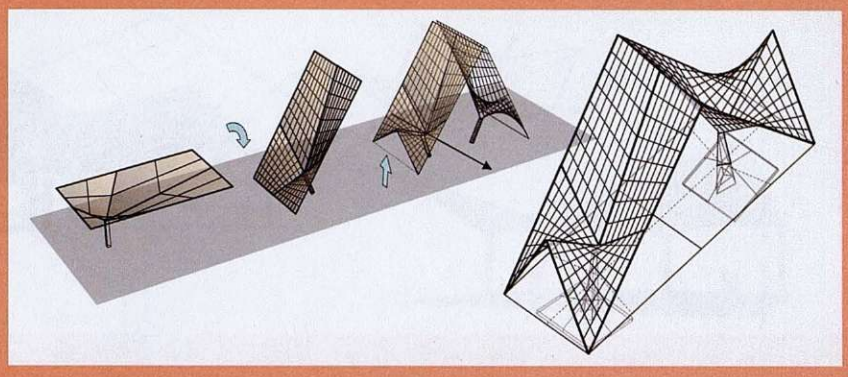
[5] En una entrevista realizada en 1961 con motivo de la concesión del premio Auguste Perret, Candela declaró que La Medalla Milagrosa era la obra que "hasta ese momento le había proporcionado más satisfacción". F. Ramírez de Dampierre, en "Temas del momento: Félix Candela", *Arquitectura*, n. 30, Madrid, 1961.

[6] F. CANDELA, "La Iglesia de la Virgen Milagrosa", en *En defensa del formalismo y otros escritos*, Xarait, pp. 51-56.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

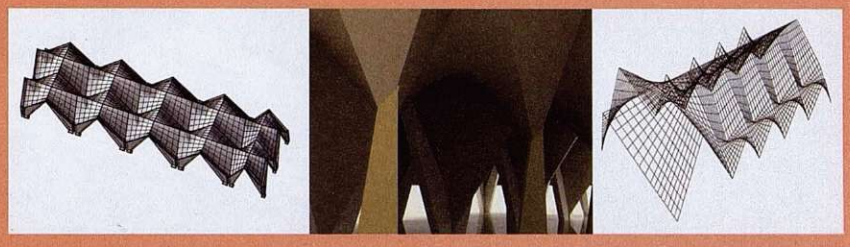
(F. 32)

Derivación de la forma del techo de la iglesia de la Medalla Milagrosa a partir de un elemento del tipo "paraguas"



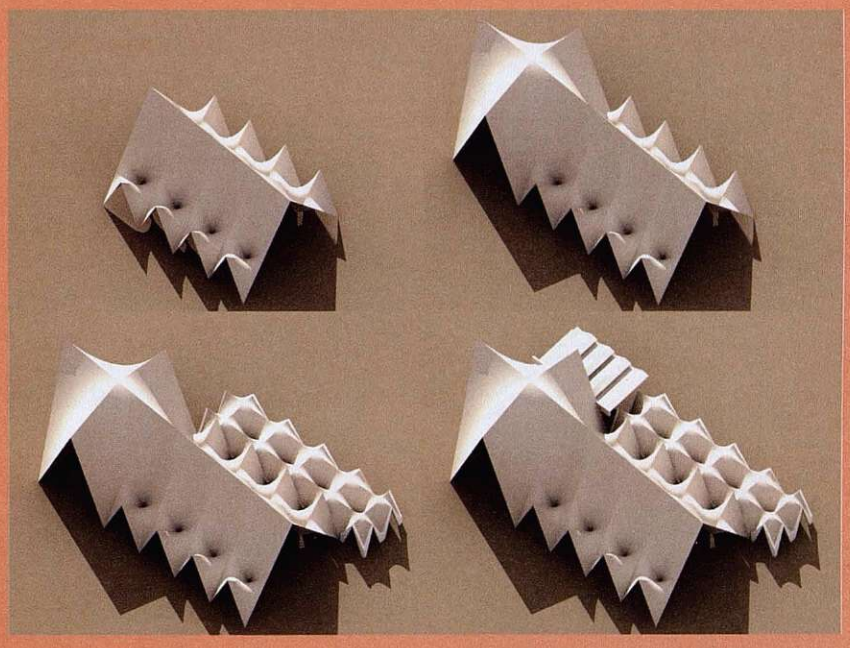
(F. 33)

Capilla lateral
Vista de los soportes



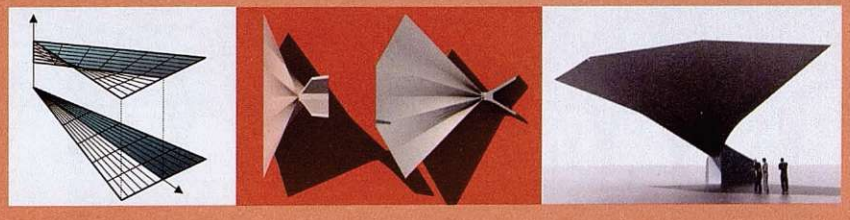
(F. 34)

Esquema de las naves y la capilla anexa

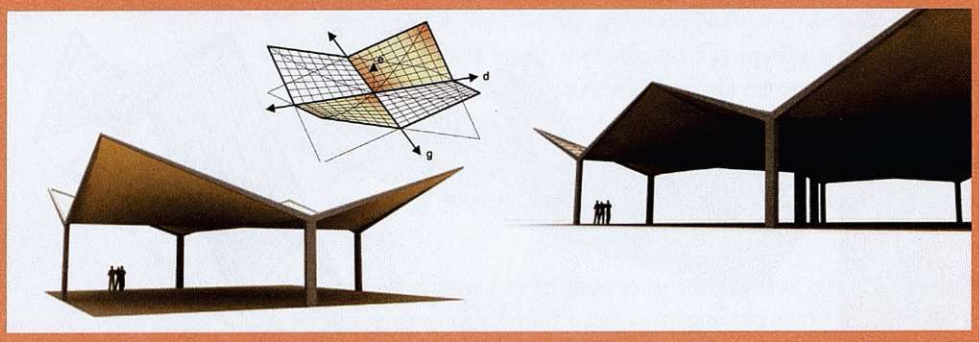


(F. 35)

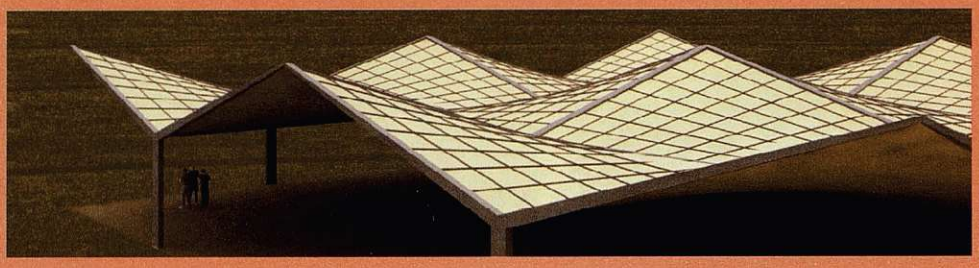
En la cubierta para Banda de Música, dos elementos simétricos se unen mediante la generatriz rectilínea vertical. Vistas del plegado de la cubierta y perspectiva del ala completa



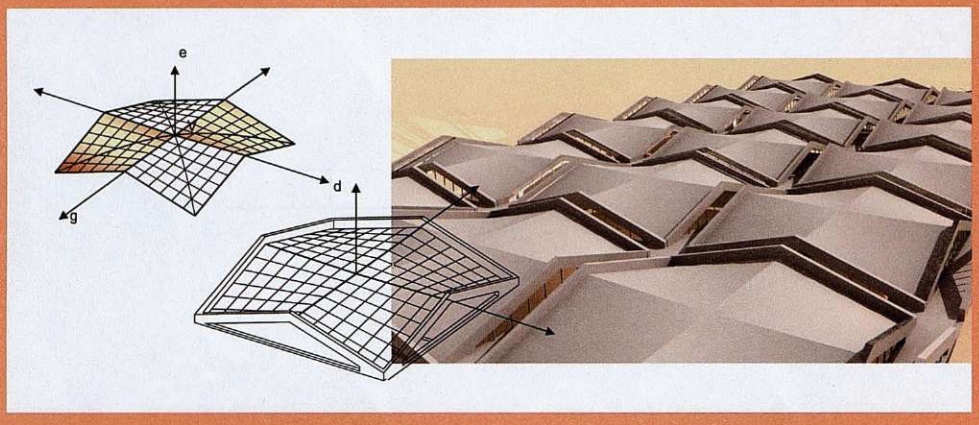
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 38 a)



(F. 38 b)



(F. 39)



(F. 40)

(F. 38 a, b)

Esquema del módulo en paraguas para los Laboratorios Lederle

(F. 39)

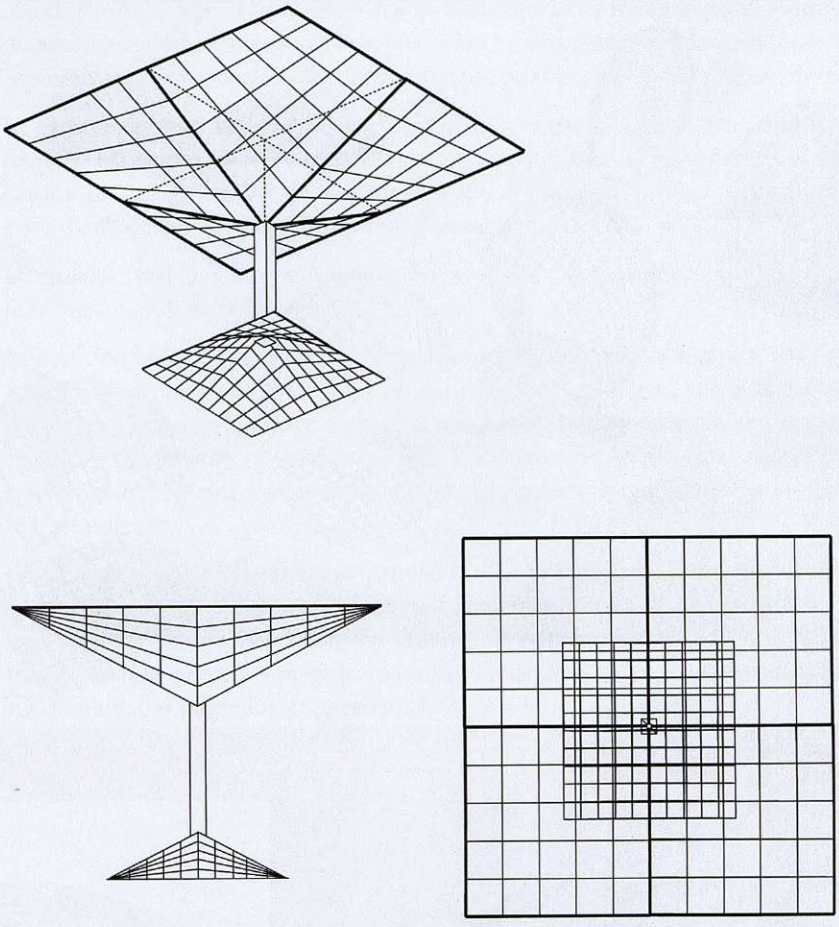
Esquema del módulo en paraguas para el Almacén de Herdez

(F. 40)

Detalle del interior con los apoyos en árbol logrados por la reunión de varios paraguas

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 37)
Paraguas de planta cuadrada y eje vertical



El paraguas

Se denomina de este modo a la estructura formada por la combinación de paraboloides hiperbólicos con planta cuadrada o rectangular que, limitados por secciones rectas, se apoya en un único soporte central que aloja la bajante pluvial. Candela pronto descubrió gran cantidad de variantes de paraguas, como son las formas de planta hexagonal o triangular. Proyectó también paraguas asimétricos y les dio distintas inclinaciones para permitir el paso de la luz. Candela usa prolíficamente esta solución para construir techos de naves, e incluso para cimentaciones, como es el caso de las zapatas de los soportes –paraguas invertidos– de la Iglesia de La Medalla Milagrosa.

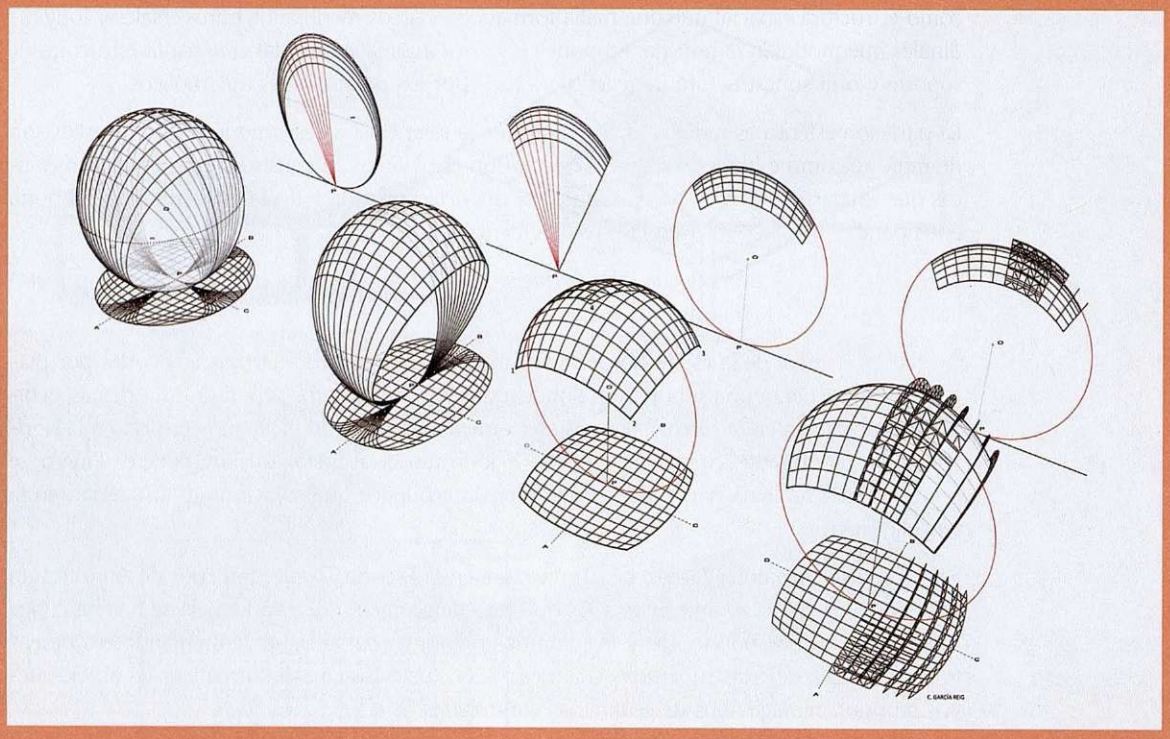
La estructura en paraguas más sencilla tiene el eje vertical, las cargas se distribuyen uniformemente en proyección horizontal y los esfuerzos oblicuos son despreciables si las superficies son rebajadas.

En los Laboratorios Lederle se cubre un almacén con un sistema de paraguas en los que se elevan los extremos respecto de la cota del vértice del paraboloide situando los apoyos en los puntos medios de los lados (F. 38 a, b).

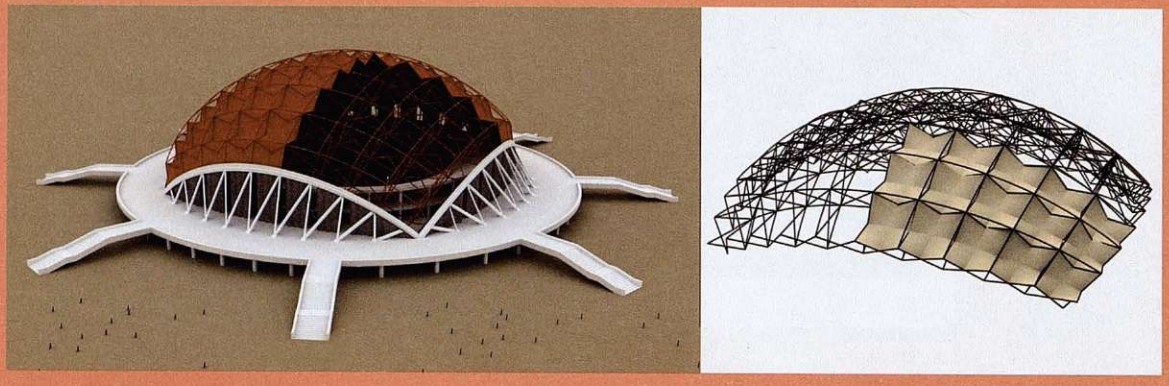
En el Almacén de Herdez en San Bartolo, México D.F., Candela separa las bóvedas para crear una abertura entre ellas con el objetivo de que la luz natural entre al interior, y crea unos pasillos entre los paraguas que luego servirán para transitar entre ellos y para la limpieza de los cristales. Los apoyos se forman con los pilares que parten de las esquinas de las cúpulas creando un soporte en forma de V con un tubo central de desagüe de la cubierta (F. 39, 40).

La última obra importante que realiza es la edificación del Palacio de los Deportes para la Olimpiada de México 1968. En el proyecto del estadio Candela recurre a la superficie esférica para crear una gran bóveda que cubra sin limitaciones el estadio de 140m de luz. Se proyecta

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 41)



(F. 42)

(F. 41)

Porción esférica que cubre el Palacio de los Deportes

Proyecciones de la estructura espacial de soporte
de la subestructura formada por paraboloides reglados

Perspectiva de la modulación

(F. 42)

Proyecciones de la estructura metálica y algunos
paraboloides reglados

Perspectiva de la modulación

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

como estructura espacial que una malla formada por arcos meridianos transversales y longitudinales que modulan la bóveda. Propone disponer una malla reticular que sea la estructura de soporte y otra subestructura de relleno formada por los paraboloides hiperbólicos.

La partición esférica es radial desde el centro de la esfera; así de este modo todos los arcos son de radio máximo e idénticos al de la esfera. Con estos arcos se construyen las cerchas metálicas que unidas entre sí y colocadas en posición, determinan la retícula estructural que soporta a los paraboloides que cubren la bóveda entera.

El resultado final es una bóveda esférica que se sostiene gracias a una estructura de barras metálicas que atiranta el conjunto (F. 41, 42).

La partición radial de la esfera no permite conseguir una retícula isótropa. Los cortes por planos radiales generan una subdivisión donde todos los cuadriláteros son distintos. Además, debido a su ubicación en la cercha, algunos arcos quedan demasiado inclinados respecto a la horizontal. Posteriormente, cuando proyecta el Velódromo de Anoeta con Emilio Pérez Piñero, se resuelve este problema partiendo de una bóveda geodésica que soluciona la disparidad en la retícula esférica.

Félix Candela terminó la carrera de Arquitectura en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid en 1935. Durante años a los docentes de geometría de esta Escuela se nos ha conocido como "los parabólicos". Hoy los alumnos de primer curso siguen enfrentándose a desentrañar la magia de estas superficies cuádricas; los actuales sistemas informáticos les abren nuevos mundos inimaginados de geometrías controladas.

Referencias

[1] Candela F.: *En defensa del formalismo y otros escritos*, Xarait, 1985.

[2] Engel H.: *Sistemas de estructuras*, Gustavo Gili, 2003.

[3] Faber C.: *Las estructuras de Candela*, Compañía Editorial Continental, s.a., 1970.

[4] Taibo Fernández A.: *Geometría descriptiva*, Tébar, 1998.

[5] Torroja Miret E.: *Razón y Ser de los tipos estructurales*, csic, 1998.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



5 MATERIAL: HORMIGÓN ARMADO
MATERIAL: REINFORCED CONCRETE

Félix Candela Outeriño: secretos de la durabilidad de su obra

RAFAEL TALERO

Embotelladora Bacardí
Cuautitlán, México, 1958

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Félix Candela Outeriño: secretos de la durabilidad de su obra

Rafael Talero Morales

Dr. en Química Industrial y Lcdo. en Farmacia - UCM
Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", Madrid
Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC

Algunas cuestiones sobre la durabilidad del hormigón

El hormigón: su aptitud para durar muchos años y de forma económica

¿Cuánto tiempo debe *durar* una obra de hormigón? Esta cuestión, pertinente para otro tipo de materiales y productos como el acero y otros metales y/o aleaciones metálicas con los que se fabrican vehículos a motor, electrodomésticos, etc., es inapropiada para el hormigón. El hormigón es el principal componente del patrimonio inmobiliario que se construye, y como tal, se debe de asegurar que se transmita de generación en generación sin un esfuerzo económico considerable.

La *durabilidad* de las obras de hormigón no es una característica medible, pero la *Buena Práctica* en su diseño, fabricación, transporte, vertido, colocación y puesta en obra, vibrado y curado hídrico determinarán la *duración* de su utilización o la *vida útil* del mismo. Si una obra es concebida para 50 años o para 100 años, y si pasados todos esos años aún continúa siendo útil, el subconsciente nos dirá que deberá seguir siéndolo siempre... Su vocación es entonces que sirva para todo el tiempo que haga falta, con un mínimo de conservación y mantenimiento periódico. Por consiguiente y de acuerdo con dicha consideración anterior, las obras de hormigón no tienen más remedio que ser *durables*. Un ejemplo manifiesto es la Capilla de Palmira, la Fábrica Bacardí y la Iglesia de la Milagrosa construidas por Félix Candela (F. 1 a, b, c).

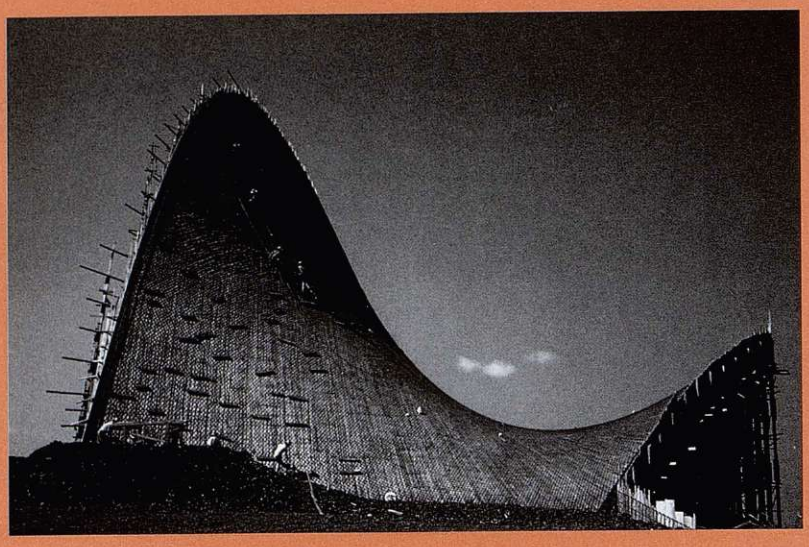
Ambas obras supusieron una auténtica innovación en los sistemas de construcción para su época, conservándose además sus estructuras todavía tal y como se proyectaron, lo que motiva que continúen siendo visitadas por especialistas nacionales y extranjeros para ver y estudiar sus soluciones estructurales, cuya perfección fue tal, que junto con la extraordinaria calidad del material hormigón armado que utilizó, les aseguró su dilatada *durabilidad* que nuestra generación está certificando y certificará seguramente la venidera y muchas más...

Ahora se sabe por tanto con algo más de detalle merced a la interesante obra de Félix Candela, lo que es la *durabilidad* y sobre qué materiales tipo debe y puede ser estudiada para las obras de hormigón armado, caso por ejemplo de todas las obras que construyera Félix Candela con hormigón armado de cemento portland puro, y para cuales otros materiales no resulta tan necesario.

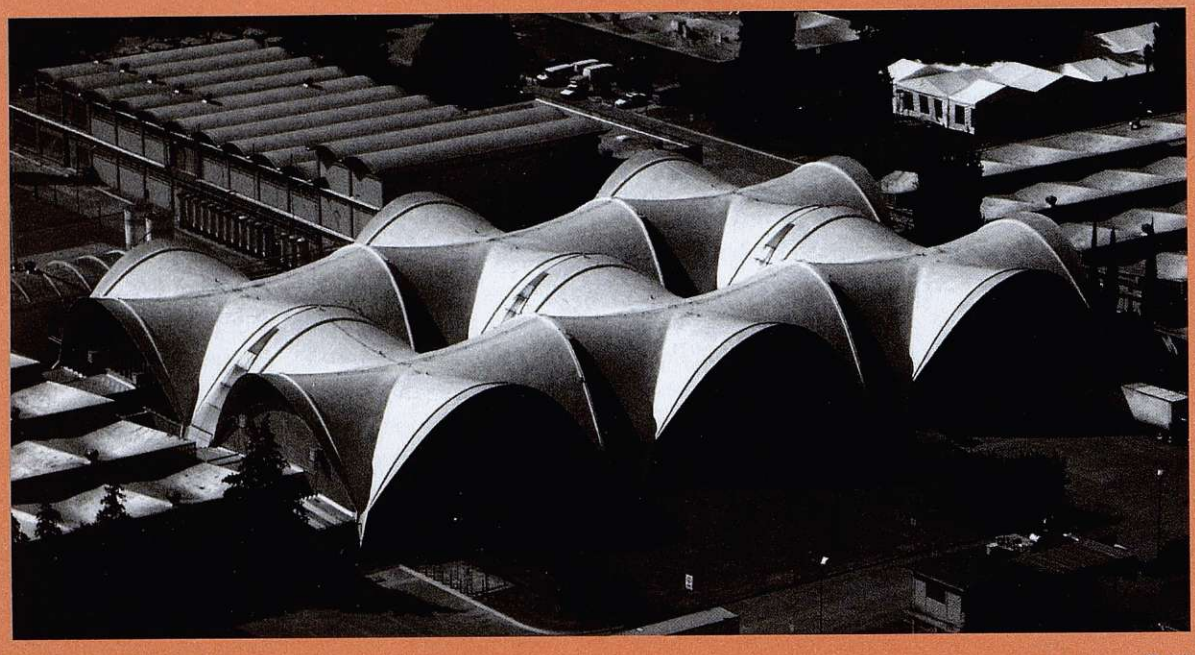
La *durabilidad* es un objetivo de calidad para el ingeniero y el arquitecto, y el papel de ambos consiste en cumplir con los objetivos fijados al menor coste económico. He aquí la dificultad. ¿Cómo hacer para una obra cuya *durabilidad* no tiene una vida útil fijada de antemano, como así puede ser el caso de toda la magna obra de Félix Candela referida antes? Todo el mundo puede ver el patrimonio de las obras de arte y el patrimonio monumental, que al ser obras antiguas resultan ser un reconocimiento para la arquitectura y la ingeniería civil. Y todas ellas son el resultado de dos reglas que en cada época permitieron conciliar economía y *durabilidad*:

- Regla 1: *La experiencia del tiempo*. Toda variante y toda innovación, debe ser evaluada por comparación con lo que ya se conoce por haber sufrido la experiencia del tiempo.
- Regla 2: *La publicación de reglas de comparación*. Las reglas de comparación entre lo tradicional y lo innovador deben dar lugar a una deliberación intra e inter-profesional con vistas a determinar aquellas que, en cada época, parecen las mejores adaptadas.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 1a)



(F. 1b)



(F. 1c)

(F. 1 a, b,c)

Capilla de Palmira en Cuernavaca

Fábrica Bacardí en Cuautitlán Izcalli

Iglesia de la Medalla de la Virgen Milagrosa en Narvarte

© Avery Architectural and Fine Arts Library. Columbia University

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

En nuestros días, la primera de las reglas se aplica principalmente en los laboratorios, mientras que la segunda se traduce en la elaboración de normas, códigos de Buena Práctica y reglamentos. El fundamento de una aproximación económica de la *durabilidad* reside pues en la ligazón necesaria entre los resultados experimentales y el marco normativo.

Así, el objetivo de la calidad se analiza en múltiples prestaciones: comportamiento del hormigón en las condiciones experimentales particulares donde se refuerza un mecanismo de degradación posible, definiéndose así las prestaciones específicas de *durabilidad* que son posibles. Considerando una o varias de estas prestaciones, un hormigón puede ser más (o menos *durable*) que otro hormigón. Luego la palabra *durabilidad* tiene dos sentidos distintos: para el maestro de obra, es el de la *durabilidad-objetivo*, mientras que para el responsable del laboratorio, es el de la *durabilidad-prestaciones*. El segundo sentido permite la comparación cuantitativa en los límites fijados para cada protocolo experimental.

El hormigón *durable*, más allá del hormigón simplemente resistente

Para conocer experimentalmente la *durabilidad* del hormigón es necesario estudiar su resistencia frente a un cierto número de mecanismos susceptibles de degradarlo. El tema de la *durabilidad* se dispersa entonces inevitablemente al ser variados y diferentes los medios agresivos que lo pueden degradar. En este artículo se va a tratar únicamente más adelante y de forma somera, la acción positiva o negativa del anhídrido carbónico, CO_2, del aire para el hormigón, al tener relación cierta la primera, la positiva, con la llamada "piel" del hormigón.

Resulta indispensable por tanto, tener una vista de conjunto de todo el problema agresivo. Así, una manera práctica de conseguirlo es partiendo siempre de la resistencia mecánica a compresión tomada como criterio global y discutir la *durabilidad* en dos tiempos:

- por una parte y a igualdad de todo lo demás, comparar los hormigones que no difieren más que en su resistencia mecánica, y
- por otra y a resistencia mecánica a compresión constante, examinar los parámetros específicos de la *durabilidad*.

Pero es que el criterio de resistencia mecánica debe ser completado también por otras condiciones de orden técnico, mecánico, químico y/o físico. A continuación, se exponen algunos ejemplos:

- Condiciones de orden técnico: Independientemente de la clase de resistencia mecánica, el hormigón debe ser correctamente colocado y puesto en obra y protegido contra la evaporación de su agua de amasado interna. Las capas superficiales del hormigón son especialmente sensibles a los tratamientos prolongados. Así, el primer milímetro de su espesor, mal llamado "piel", puede ser debilitado por un alisamiento excesivo con la llana y, en ese caso, el desconchado bajo el efecto de sales fundentes será dos veces más rápido. De la misma manera, la ausencia de productos de curado que protejan contra la evaporación sin más de su agua de amasado, puede acarrear un proceso de endurecimiento rápido del recubrimiento de las armaduras (de algunos centímetros), con lo que la porosidad se ve favorecida y, con ella, la *permeabilidad* al CO_2 del aire. Por consiguiente, refrendar una resistencia mecánica suficiente es aún un medio útil de estimar la *durabilidad* pero no el único. Ya que es necesario precisar que esta resistencia mecánica debe ser obtenida con un curado hídrico realista, es decir, exactamente el curado hídrico del hormigón en la obra tal y como así lo especifica expresamente la vigente Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 en su Artículo 71, apartado 6 [1]. En el caso frecuente donde no se previene alguna protección particular después del desencofrado, se necesita asegurar en el momento del desencofrado, que el hormigón tiene el nivel de resistencia mecánica requerido para su *durabilidad* deseada. En efecto, es necesario considerar como cierto que el hormigón de recubrimiento no desarrolla más su resistencia mecánica que el que está expuesto a una atmósfera no saturada.
- Condiciones de orden mecánico: Para ser *durable* un hormigón no debe estar fisurado. Y para poder manifestar esta condición de forma clara, es necesario distinguir con precisión entre la fisuración intrínsecamente enlazada al funcionamiento del hormigón armado o fisuración *funcional*, y la fisuración *accidental* la cual puede ser evitada siempre. Únicamente esta última es perjudicial para la *durabilidad*. La fisuración accidental resulta de las retracciones mecánicas parásitas que se manifiestan en un momento u otro de la vida del

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

hormigón, frecuentemente, en las primeras horas (cuando el hormigón aún se encuentra en estado plástico) y/o en los días posteriores al desencofrado. Y las reglas del arte no permiten evitar las retracciones plásticas por el desconocimiento que por desgracia muchos tienen todavía, de los cementos Portland y de sus adiciones especialmente, ya sean estas puzolánicas, siderúrgicas o fíllers.

- Condiciones de orden químico: Limitémonos a dos ejemplos importantes: el cemento Portland origina al hidratarse tres clases de productos de hidratación que de forma muy resumida son los siguientes: los silicatos de calcio hidratados, los aluminatos de calcio hidratados y el hidróxido de calcio o portlandita. Según el origen del cemento y el de sus adiciones activas más comunes es posible variar en gran medida las proporciones de todos estos productos, sin más que aplicar las reglas específicas normalizadas que se encuentran recogidas en la Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08 [2] (aunque en lo relativo a la resistencia al ataque del agua de mar y de los sulfatos, especialmente, las especificaciones físicas, mecánicas, pero sobre todo, químicas, son muy discutibles [3, 4], y por este motivo precisamente, manifiestamente mejorables). Y el segundo ejemplo sería el siguiente: el agua de los poros y microporos del hormigón en contacto con los hidratos es alcalina y los áridos deben ser estables en ese medio. De aquí resultan por tanto, las reglas de compatibilidad entre los áridos y el medio alcalino del hormigón y los métodos [1] [5, 7] a utilizar para asegurarla. La forma de adaptar estas reglas pueden ser los criterios de prestaciones específicas.

- Criterios de orden físico: Frente a la resistencia a los ciclos de hielo-deshielo, el parámetro de primer orden no es la *porosidad*, siendo no obstante lo suficientemente importante como para ser destacada. Por razones termodinámicas, el hielo tiende a formarse en el límite entre el aire y el agua, o interfase aire-agua. Con lo que el parámetro de primer orden para este otro fenómeno agresivo de tipo físico, es la distancia media entre cualquier punto del interior del hormigón con la interfase aire-agua más próxima. Esta distancia se reduce considerablemente añadiendo pequeñas burbujas de aire en la masa del hormigón, mediante el empleo de aditivos aireantes adecuados, con lo que la distancia media entre estas burbujas es el parámetro de primer orden en este otro caso. No obstante, al ser el fundamento de este otro ataque agresivo al hormigón de tipo físico, no será considerado en este artículo.

Finalmente, se describirán a continuación unas reglas muy generales que son las siguientes:

a) En vista del objetivo de *durabilidad*, en la elección de la clase de resistencia mecánica del hormigón en función de la agresividad del medio, se habrá de tener en cuenta que en tanto en cuanto el medio sea más agresivo, la resistencia mecánica habrá de ser más elevada, lo que se consigue con una cantidad apropiada mayor de cemento adecuado contra dicho medio agresivo, por m^3 de hormigón. Desde le punto de vista práctico, ello significa que es la exigencia de *durabilidad* la que a veces puede determinar la resistencia mecánica del hormigón a tener en cuenta en el cálculo de la obra.

b) No obstante y a pesar de la regla general anterior, se puede considerar que un nivel de resistencia mecánica adaptado al medio circundante del hormigón es un primer criterio de calidad, que sin embargo debe ser completado por otras medidas, puesto que todos los hormigones de la misma resistencia mecánica a compresión no van a tener la misma *durabilidad*. El fundamento de esas otras medidas se verá en los apartados siguientes.

El cemento Portland y estabilidad de sus hidratos

Cemento Portland

Los cementos son materiales artificiales finamente molidos, de naturaleza inorgánica y mineral. De todos ellos, el más importante es el cemento Portland. Los cementos se pueden clasificar, en líneas generales, en dos grupos: *cementos Portland* y *cementos Portland con adiciones* (cementos de mezcla), según se obtenga por la molturación conjunta de mezclas binarias de clinker Portland y de regulador de fraguado o de mezclas ternarias de clinker Portland, regulador de fraguado y una o varias adiciones minerales molidas (de manera conjunta, o por separado [3], y mezcladas posteriormente con el cemento Portland, o por ambos procedimientos, más o menos conjuntados).

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

El clinker del cemento Portland es un material artificial que se obtiene al calcinar, hasta fusión parcial a una temperatura de 1.400-1.500ºC en hornos tubulares rotatorios, mezclas optimizadas en su composición de caliza (la mayor parte), arcilla, correctores de módulo (por ejemplo arena silícea, cáscara y tallo del arroz, bagazo de la caña de azúcar -cuyas partes orgánicas sirven además como combustible- u otros materiales que aporten óxido de silicio, SiO_2) y de otros materiales denominados fundentes (trióxido de aluminio, Al_2O_3, en forma de bauxita, y trióxido de hierro, Fe_2O_3, en forma de hematite, magnetita, limonita o cualquier otro mineral de hierro, e incluso en forma de pirita). La composición mineralógica tipo del clínker Portland se encuentra en la Tabla 1 (T. 1).

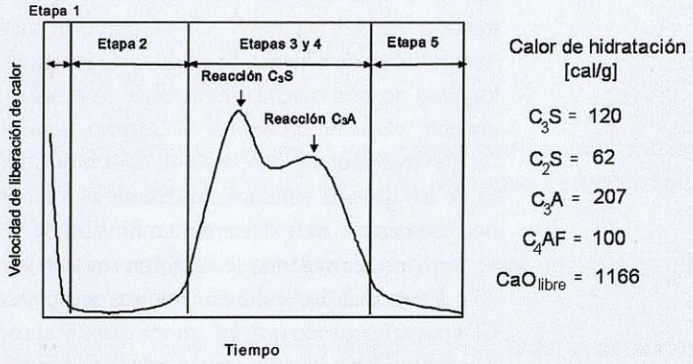
Nombre	Fórmula	Notación	Contenido [%]
Silicato tricálcico, alita	$3CaO{\cdot}SiO_2$	C_3S	45 – 70
Silicato bicálcico, belita	$2CaO{\cdot}SiO_2$	C_2S	15 – 35
Aluminato tricálcico, celita	$3CaO{\cdot}Al_2O_3$	C_3A	0 – 15
Aluminato-ferrito-tetracálcico, brownmillerita	$4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}Fe_2O_3$	C_4AF	3 – 15
Cal libre	CaO		0 – 2

(T. 1) Composición mineralógica del clinker Portland

Cuando el cemento Portland se mezcla con agua se producen una serie de reacciones químicas exotérmicas cuyos productos de reacción o hidratación referidos antes, conforman progresivamente una red sólida que se densifica con el tiempo a medida que transcurre el proceso de hidratación, aumentando progresivamente su dureza y resistencia mecánica. La secuencia de dichas reacciones puede seguirse convenientemente a través de la curva calorimétrica (F. 2), la cual representa la velocidad de evolución del calor de hidratación originado en función del tiempo. La velocidad de hidratación de los componentes del cemento Portland por separado, durante los primeros días tiene el siguiente orden $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$. De este modo, se pasa del

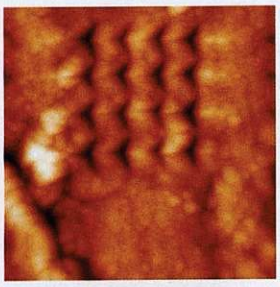
(F. 2)

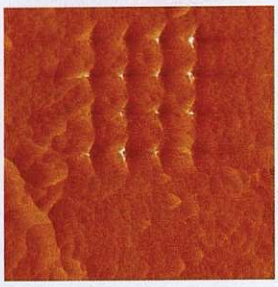
Evolución calorimétrica por etapas de la hidratación del cemento Pórtland



Estado de reacción	Cinética de reacción	Proceso químico	Propiedades
1 Hidrólisis inicial	Control químico rápido	Hidrólisis inicial y disolución de iones	
2 Período estacionario	Control de nucleación lento	Continúa la disolución de iones	Fraguado inicial
3 Aceleración	Control químico rápido	Formación inicial de productos de hidratación	Fraguado final y endurecimiento inicial
4 Desaceleración	Control químico y de difusión lentos	Continúa la formación de productos de hidratación	Velocidad de resistencia inicial
5 Estado estático	Control de difusión lento	Lenta formación de productos de hidratación	

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 3 a, b)

Microfotografías después de la nanoindentación del gel CSH en un mortero de cemento Pórtland (área de barrido = 2 μm).

a) Imagen topográfica (Z = 26 mm)

b) Imagen de fase [20]

estado plástico al estado endurecido. Este proceso es muy rápido en el caso del clinker Portland, razón por la cual se le incorpora el *regulador de fraguado* anteriormente mencionado (normalmente, piedra de yeso natural, $CaSO_4{\cdot}2H_2O$, en cantidad óptima [3][8, 9] o al menos adecuada), pues si no, sería imposible utilizarlo para la construcción. Su función es ralentizar, retrasar o retardar la muy rápida hidratación inicial del C_3A, motivo por el cual en un principio se le denominó también *retardador de fraguado*, término este otro, con el que aún se le conoce en la actualidad. En este contexto, se diferencian entonces claramente dos etapas en el proceso de hidratación: la primera, el *fraguado*, que representa la pérdida de la plasticidad inicial de la pasta y, la segunda, el *endurecimiento*, que se traduce en su consolidación ulterior hasta adquirir características pétreas.

Por otra parte, la hidratación de las fases del cemento Portland, produce una rápida saturación y sobresaturación incluso de la fase líquida en hidróxido de calcio, $Ca(OH)_2$ (abreviadamente *CH*, según la notación propia de la Química del Cemento), denominado por su origen portlandita, procedente entre otros de los silicatos de calcio, alita y belita, los cuales originan además la aparición de una red de silicatos de calcio hidratados sin fórmula definida $(CaO)_x{\cdot}(SiO_2)_y{\cdot}(H_2O)_z$, denominados en principio gel CSH (producto de reacción mayoritario). Esta red de silicatos de calcio hidratados, más adelante cuando se consolidan y/o cristalizan, se denominan tobermoritas, las cuales según Taylor [10] son del tipo I o de origen cemento Portland, a diferencia de los de tipo II, que son de origen puzolana. El parámetro característico del gel CSH ha sido tradicionalmente su relación *Ca/Si*, habiéndose clasificado de menor a mayor basicidad en función de dicha relación. Los valores que han sido aportados por los investigadores se encuentran en el intervalo de $0{,}7 < Ca/Si < 2{,}3$.

En relación al gel CSH e independientemente de su origen, cabe preguntarse: ¿cómo contribuye la diferente composición del gel CSH a las propiedades mecánicas y a la *porosidad* del hormigón? Antes de todo, para responder a esta pregunta se deberá definir la estructura del gel CSH en base a las numerosas investigaciones teóricas y experimentales realizadas hasta la fecha con ese objetivo. En una primera etapa y merced a los estudios de Powers y Brownyard [11], se reconocían las propiedades de coloide y gel de los silicatos de calcio hidratados, asociándosele a esta fase una *porosidad* de aproximadamente el 28%. Desde entonces, se han venido desarrollando numerosos modelos que describen la estructura del gel CSH como laminada, donde las cadenas de silicatos se sitúan en láminas paralelas, dejando espacios interlaminares en los que se adsorben fuertemente moléculas de agua; dichos espacios interlaminares son inferiores al tamaño de diez moléculas de agua, por lo que se estableció que dicha agua debía pertenecer a la propia estructura del gel y no a agua libre sin combinar químicamente [12, 14]. Recientemente, en una serie de estudios se han obtenido evidencias cualitativas y cuantitativas de una estructura amorfa coloidal del gel CSH organizada en *glóbulos*, los cuales son unidades constitutivas que por diferentes modos de empaquetamiento conducen a las diferentes estructuras y tipologías de gel CSH; dentro de dichos *glóbulos* se encuentra el agua estructural y nanoporos, ocupando éstos una fracción del 18% [15, 17]. Desde un punto de vista molecular, los *glóbulos* están compuestos por agrupaciones de cadenas de silicatos de longitud variable estabilizadas por átomos de calcio. La longitud de tales cadenas se establece en función del número de átomos de silicio unidos directamente mediante un átomo de oxígeno, habiéndose obtenido que las longitudes posibles son las que responden a la serie 3n-1, para n = 1, 2 o 3 [10][18]. Por otra parte, el empaquetamiento de los *glóbulos* conduce finalmente a dos tipos de gel CSH con porosidades y propiedades micromecánicas muy diferentes en función de su densidad de empaquetamiento. Por una parte se tiene un *gel CSH de alta densidad* con un 24% de porosidad y un *gel CSH de baja densidad* con un *37% de porosidad*. Sus módulos elásticos se sitúan entre 26-39 GPa para el primero y entre 13-26 GPa para el segundo [19]. En ambos casos y al contrario de lo que sucedía en los *glóbulos*, el agua que rellena los poros de ambos geles no es agua estructural. Asimismo, la diferencia en la proporción entre ambos geles diferencia a su vez unas matrices de cemento de otras, lo cual es consecuencia de las diferentes condiciones en las que transcurran los procesos de hidratación. En la (F. 3) se pueden observar las impresiones plásticas residuales del ensayo de nanoindentación de un gel CSH a los 545 días perteneciente a un mortero de cemento Portland [20]. Ambas microfotografías se obtuvieron mediante microscopía SPM/AFM en modo de no contacto; la microfotografía de la izquierda es la imagen topográfica donde se observan dieciséis nanoindentaciones y la estructura de granos del gel CSH, dichos granos son agrupaciones de *glóbulos* empaquetados. La microfotografía de inferior muestra el valor de fase de la oscilación de la punta del microscopio, la escasa variación de color demuestra la existencia de una sola fase, el gel CSH.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Continuando pues con la hidratación de las otras fases del cemento Portland, cabe decir que la hidratación de los aluminatos de calcio se puede producir en presencia o ausencia de yeso. Así, cuando la hidratación de los aluminatos de calcio se produce en presencia de yeso, se forma trisulfoaluminato de calcio hidratado, denominado *ettringita* o *Fase AFt*, y en determinadas circunstancias (con la razón molar $SO_3/Al_2O_3 < 3$, de todos los cementos), se forma también el *monosulfoaluminato de calcio hidratado* o Fase *AFm*. Ambas fases alumínicas (y sus equivalentes férricas por sustitución de parte de los átomos de aluminio por los de hierro) son componentes susceptibles de transformación en presencia de determinadas sustancias químicas incluso después del fraguado. Un ejemplo es la formación tardía de *ettringita* a partir de Fase *AFm* y aniones sulfato, SO_4^{2-}, caso más común, o si en el medio se halla alguna fuente de anión cloruro, Cl^-, que se forma la *sal de Friedel* [21], la cual nuevamente en presencia de aniones sulfato suficientes produce *ettringita* [22], mientras que en presencia de carbonatos (da calcio, por ejemplo, calcita) forma *carboaluminatos de calcio hidratados*, e incluso *thaumasita* a baja temperatura especialmente. Como se expondrá más adelante, algunas de las transformaciones de los aluminatos de calcio hidratados causan cambios relativos de volumen con la aparición de microfisuras en el material cementante y la subsiguiente reducción de su resistencia mecánica y estabilidad de volumen, e incluso mayor vulnerabilidad al ingreso de otros agresivos químicos.

Las numerosas reacciones químicas exotérmicas de la hidratación del cemento Portland se pueden presentar como siguen:

Silicatos de calcio: $C_3S,\ C_2S + H_2O \rightarrow gel\ \text{CSH} + CH + Q_1$ [r1]

Aluminato tricálcico y ferrito-tetracálcico: $C_3A,\ C_4AF + H_2O + CaSO_4 \rightarrow Fase\ AFt + CH + Q_2$ [r2]

$C_3A + Fase\ AFt \rightarrow Fase\ AFm + Q_3$ [r3]

La *solubilidad* de la portlandita, *CH*, en el agua pura a 25 ° *C* es 1,15 g/l, pero como tal, no hay molécula alguna disuelta en dicha agua dado que su disociación es completa, siendo los iones Ca^{2+} acomplejados parcialmente por los iones OH^-. Así, la composición química de dicha agua vendrá dada por las concentraciones de $[Ca^{2+}]_{total}$ y $[CaOH^-]_{total}$. Las reacciones químicas son las que se muestran a continuación:

$Ca\ (OH)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2OH^-$ (disociación total) [r4]

$Ca^{2+} + OH^- \leftrightarrow CaOH^-$ (equilibrio) [r5]

Para el agua pura bastará determinar la situación del equilibrio [r5]. Para un sistema más complejo no ocurre lo mismo. Frecuentemente se utiliza el *producto de solubilidad aparente*:

$$S' = \frac{S}{g_A^x \cdot g_B^y} = C_A^x \cdot C_B^y \qquad \text{[Ec1]}$$

La medida de las concentraciones molares C_A y C_B permite obtener una constante que sitúa el sistema en equilibrio, sea cual sea el medio. Por tanto, se pueden considerar tres estados posibles de una disolución:

- cuando el producto iónico sea igual al *producto de solubilidad*, se estará en una situación de equilibrio,
- cuando el producto iónico sea superior al *producto de solubilidad*, la disolución se encontrará en el dominio supersaturado o sobresaturado, y
- cuando el producto iónico sea inferior al *producto de solubilidad*, la disolución se encontrará en el dominio subsaturado.

Estabilidad de los productos de hidratación en función del pH

La disolución de los poros capilares

Los productos de hidratación del cemento están en contacto con la denominada *disolución capilar*. Estos productos junto con la disolución y los componentes aún anhidros del cemento cam-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

bian en su composición y proporción con el tiempo. Después de un periodo inicial, en el que se producen los primeros estadios de la hidratación y cambios muy rápidos, la disolución capilar queda sobresaturada respecto a cada uno de los productos de hidratación presentes en el sistema. Para el yeso, la *ettringita* y el silicato de calcio hidratado, dicha sobresaturación se alcanza en pocos minutos. El *p*H se sitúa por encima de 13 después de algunas horas, y algunas decenas de horas después, el agotamiento del yeso provoca la desaparición de la mayor parte de los iones sulfato de la disolución. Teniendo en cuenta el equilibrio de solubilidad de estos productos, la disolución se va empobreciendo en iones calcio a causa del paso a la misma de los iones alcalinos del clinker Portland y de los iones OH^-. En la Tabla 2 (T. 2) y a título de ejemplo, se muestran algunos valores típicos de la composición química de la disolución capilar de un cemento Portland a la edad de 1 mes.

ESPECIE	MOLARIDAD (mmol/l)
Calcio total	1,48
de los cuales Ca^{2+}	0,48
de los cuales $CaOH^+$	1,00
Sulfato total	0,59
de los cuales SO_4^{2-}	0,35
de los cuales KSO_4^-	0,23
de los cuales $CaSO_4$	0,0011
Alcalinos totales	300
Aluminato total	1,51
Silicato total	0,10
pH	13,30

(T. 2) Composición típica de la disolución capilar para un cemento Portland a la edad de un mes

Esta disolución está casi en equilibrio con los siguientes hidratos: portlandita, *Fase AFm*, aluminato de calcio hidratado, hidróxido de aluminio y silicato de calcio hidratado. Por consiguiente, todos los entornos químicos serán más ácidos que la disolución capilar y las reacciones químicas ácido-base jugarán un papel fundamental frente a la *durabilidad*.

En el caso del hormigón, todas las concentraciones iónicas de la disolución capilar del hormigón están reguladas por la presencia simultánea de numerosos hidratos del cemento que constituyen con sus *solubilidades* y *productos de solubildad* un efecto *tampón* que le da estabilidad a todos los hidratos, e incluso, un efecto *super-tampón*. El efecto *super-tampón* es tanto más poderoso cuanto mayores son los exponentes de concentración en la expresión de sus respectivos *productos de solubilidad*, los cuales además suelen ser por lo general bastante elevados. Esta auto-regulación de la fase líquida, le confiere al hormigón capacidad propia de resistencia a la agresión química, es decir, *durabilidad*.

Límites del efecto *super-tampón*. El estado último del hormigón

El efecto *tampón* no puede producirse si la cantidad de mezcla *tampón* no es suficiente. Cuando la proporción de ácido agresivo (en superficie especialmente) y los tiempos de contacto son muy importantes, el *p*H acaba por disminuir por debajo de 9, dominio donde ninguno de los productos de hidratación *básicos* del hormigón es estable. Entonces, se produce la precipitación de yeso y de los hidróxidos de silicio, de hierro y de aluminio que constituyen un gel. La acción del anhídrido carbónico del aire precipita el calcio en forma de carbonato de calcio. Si el proceso es lo suficientemente lento para no acabar con la degradación prematura de la obra de hormigón, este compuesto podrá mantenerse en equilibrio con la atmósfera. Sin embargo, al cabo de mucho tiempo en términos geológicos, estas especies químicas artificiales que también participan en la morfogénesis de las rocas naturales, se puede prever que el estado final del hormigón será una mezcla de cuarzo, material calizo y arcilla. Finalmente, el mecanismo regulador

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

del efecto *tampón* se echa en falta igualmente cuando los productos de las reacciones químicas *ácido-base* mencionadas, son eliminados a medida que se forman. Este es el caso cuando el hormigón está sometido a un lavado prolongado, por ejemplo, por las aguas de lluvia (lixiviación = extracción por disolución y gradiente de concentración). De todo ello se desprende por tanto, una consecuencia práctica para el arquitecto o ingeniero: se deberá tener mucho cuidado en respetar las reglas de *Buena Práctica* en materia de arquitectura e ingeniería civil, y de protección de las obras contra el chorreo del agua, como ya se hacía antiguamente para las construcciones en piedra, y especialmente, si ésta era piedra arenisca. Esto evitará no solamente las suciedades de aspecto estético desagradable sino también permitirá que el hormigón ponga en juego sus defensas mediante diferentes mecanismos químicos.

Los áridos y su influencia en la durabilidad

Hasta aquí se ha escogido consagrar los párrafos precedentes a las propiedades de las pastas de cemento principiopalmente. Así, la abundancia de datos de laboratorio relativas a las pastas permiten, en efecto, poner bien de relieve la importancia del parámetro relación a/c y las condiciones de hidratación.

Si estas principales conclusiones son aplicables a hormigones, lo que no es descartable, para las estimaciones cuantitativas de las propiedades de transferencia, se debe considerar al hormigón como un simple material artificial sólido y compacto, constituido, por un lado, por pasta de cemento, y de otro, por áridos que al decir de muchos son totalmente inertes; lo que no es del todo cierto, ni física ni químicamente [23, 25]. En cambio, B. Mather y M.D. Cohen, a propósito de un artículo que publicaron al respecto [26] opinaban lo contrario, es decir, que las pastas puras de cemento y sus hormigones eran dos materiales diferentes que no podían ser comparados en su comportamiento frente al ataque de los sulfatos o de cualquier otro medio agresivo o no, debido a que la "zona de transición" a la interfase entre los áridos y la pasta de cemento del hormigón, no se encontraba presente en la pasta pura de cemento, por cuyo motivo no era apropiado considerar el comportamiento de esta última representativo del comportamiento del correspondiente hormigón. De aquí que en una de sus conclusiones resaltaran la importancia del tipo de árido en la referida "zona de transición" a la interfase, o ZTI (o "aureola de transición", como se verá más adelante), preguntándose además a continuación los autores en dicho artículo, qué papel en la resistencia mecánica y en la *durabilidad* del hormigón. Y es que ambos autores [26] estaban en lo cierto, como lo acaban de demostrar experimentalmente A. Delgado y R. Talero [20].

Por lo que a continuación se expone brevemente el papel que juegan los áridos, y más en el hormigón, por las interfases pasta-árido. Así, en las proximidades de la interfase pasta-árido, las condiciones locales de hidratación son modificadas desde el inicio de las reacciones de hidratación, debido a la presencia de un exceso de agua de amasado. Ya sea por el efecto pared o por la exudación. Ello da por resultado, por una parte, un aumento local del volumen de poros en los que los hidratos pueden desarrollarse y, de otra, la formación de un gradiente de contenido de agua. De este modo, la estructuración de la pasta de cemento se ve modificada en una distancia de algunas decenas de micrométros. Esta zona interfacial, influenciada por la presencia de los áridos, se llama como decimos, *aureola de transición*.

La microestructura de la *aureola de transición* tiene las siguientes características principales:

- la *porosidad* en las proximidades de la interfase resulta ser más elevada que la del interior de la propia pasta de cemento, lo que se puede poner en evidencia por análisis de imagen [31], por lo que al añadir arena al cemento se crea una nueva familia de poros de diámetro comprendido entre 0,1 y 1 micrómetro,
- los hidratos se desarrollan con un gradiente de concentración en la *aureola de transición*,
- los cristales formados son de dimensiones mayores y el crecimiento de la portlandita orientada a lo largo de la interfase según su plano de clivaje es sencillo.

Pero los áridos introducen también otros efectos que no van todos en el mismo sentido:

1. El efecto pared introducido por los áridos sobre los granos de cemento conducen a una densificación en la región de la pasta exterior a la *aureola de transición*, lo que se traduce en una ralentización del transporte de materia en esta región.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

2. En el análisis de las diferencias entre la pasta y el hormigón, no es necesario sobrestimar la contribución aportada por la *permeabilidad* intrínseca de los áridos. Si como suele ser habitual, su *porosidad* es muy inferior a la de la pasta, su *permeabilidad* es también diferente lo que se podrá prever en un primer análisis (T. 3). Estos resultados se explican por una distribución del tamaño de los poros totalmente diferente: en general, por debajo de los 10 micrómetros para los poros de los áridos, y en el dominio ente los 10 y 100 nanómetros, para lo esencial con las pastas de cemento. Lógicamente, las condiciones son diferentes con áridos impermeables; su presencia constituye entonces los obstáculos interpuestos sobre el progreso del transporte de materia en la pasta de cemento, lo que puede introducir una *tortuosidad* suplementaria. El factor juega, para un hormigón, en el sentido de una reducción de la velocidad de transporte al volumen de pasta.

3. En los hormigones ordinarios, los áridos son menos deformables que la pasta de cemento; lo que da por resultado una concentración de retracciones en las zonas interfacilaes pudiéndose desarrollar además una microfisuración preferencial, tanto como la presencia de grandes cristales de portlandita orientados según su plano de clivaje lo que favorece la extensión de las discontinuidades.

Tipo de árido	Coeficiente de permeabilidad (m/s)	Relación agua/cemento de pastas para obtener la misma permeabilidad
Basalto denso	$2{,}47 \cdot 10^{-14}$	0,38
Diorita cuarzítica	$8{,}24 \cdot 10^{-14}$	0,42
Mármol 1	$2{,}39 \cdot 10^{-13}$	0,48
Mármol 2	$5{,}77 \cdot 10^{-12}$	0,66
Granito 1	$5{,}35 \cdot 10^{-11}$	0,70
Arenisca	$1{,}23 \cdot 10^{-10}$	0,71
Granito 2	$1{,}58 \cdot 10^{-10}$	0,71

(T. 3) Comparación de la permeabilidad de diferentes tipos de rocas y de pastas de cemento [28]

El resultado global de estos diferentes efectos es a priori incierto. Los resultados obtenidos por Richet y Oliver [29] indican que, en el caso de morteros comparados a sus pastas constitutivas, este efecto global es muy débil sobre la *difusividad* al agua marcada por tritio (este marcador ha sido elegido por los autores porque interactúa muy poco con la fase sólida). Por el contrario, las microfisuraciones estructurales se traducen en un aumento de la *permeabilidad* al agua: a igualdad de contenido de agua, los hormigones pueden ser hasta 100 veces más permeables que las pastas puras.

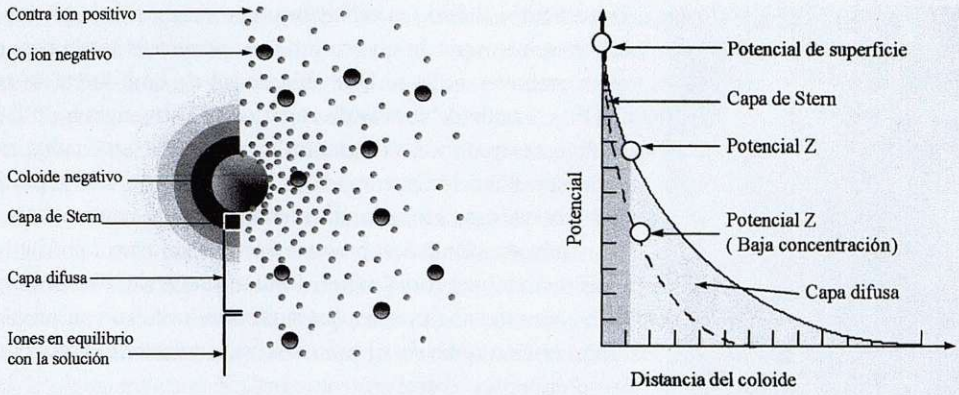
No obstante, una razón puramente química ha pasado desapercibida hasta el momento y es la siguiente: si el árido cristalino es de naturaleza *silícea*, caso por ejemplo del *α-cuarzo* ó α-SiO_2, su carácter químico es *ácido*, dado que se trata de un anhídrido *ácido*, por lo que sus partículas adquieren una carga negativa cuando se dispersan en agua (y si además dicho árido silícico es de machaqueo, con mucha mayor razón todavía por causa de su molienda precisamente [24-25]).

En el caso de la sílice cristalina, esta carga negativa es debida a los grupos silanol, *Si-OH*, perdiendo un protón, es decir, $Si\text{-}OH \rightarrow Si\text{-}O^- + H^{+-}$, con lo que la fase acuosa llega a hacerse ligeramente ácida porque recibe protones, mientras la superficie de la partícula de sílice llega a hacerse negativa, debido a la formación en ella del anión $Si\text{-}O^-$, atrayendo por este motivo inicialmente una rígida capa de iones con carga contraria (de Ca^{2+} de origen portlandita, en este

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 4)

La "doble capa" está formada por la "Capa de Stern", (constituida por una capa de contra-iones) y la "Capa Difusa" (constituida también por más contra-iones y algunos co-iones)



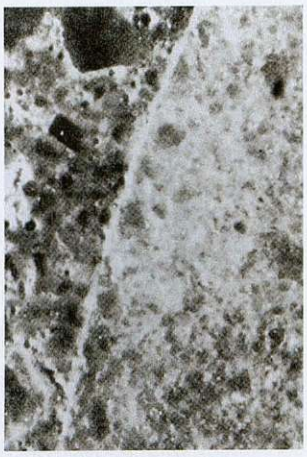
caso), o contra-iones, de dicha fase acuosa; esta 1ª capa de contra-iones es conocida con el nombre de *capa de Stern* [30], véase la (F. 4), la cual no logrará compensar plenamente la carga superficial negativa de la partícula de sílice, lo que justifica que el primitivo grupo $Si\text{-}O^-$ de la partícula de sílice cargada negativamente logre atraer una 2ª capa de contra-iones de Ca^{2+} del mismo origen (portlandita), pero estos son ahora rechazados a su vez por la *capa de Stern* así como por otros iones positivos que intentan acercarse a dicha partícula de sílice. Este equilibrio dinámico resulta finalmente en la formación de una *capa difusa* de contra-iones (F. 4). Los contra-iones de la *capa de Stern* y de la *capa difusa* son los que juntos se denominan la "doble capa". Y el espesor de esta "doble capa" depende del tipo y concentración de los iones de la disolución. Un punto de particular interés es el potencial donde se unen la *capa difusa* y la *capa de Stern*. Este potencial es conocido con el nombre de "potencial zeta", el cual es importante porque puede ser medido de una manera muy simple, mientras que la carga de la superficie de la partícula de sílice y su potencial no pueden medirse.

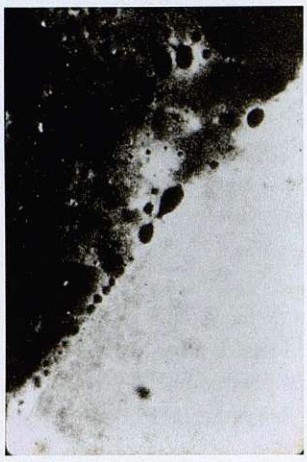
La teoría DLVO (llamada así por Derjaguin, Landrau, Verwey y Overbeek [30]), es la clásica explicación de los coloides en suspensión, y la partícula de sílice cargada negativamente junto con su "doble" capa, se puede considerar también como un coloide. Ésta se basa en el equilibrio entre las fuerzas opuestas de repulsión electrostática y atracción tipo van der Waals, y explica por qué algunos coloides se aglomeran mientras que otros no lo hacen: la curva combinada es la energía neta de interacción. Si existe una zona repulsiva, entonces el punto de máxima energía de repulsión se llama "barrera de energía". La altura de esta barrera indica cuan estable es el sistema. Para aglomerar dos partículas que van a chocar, éstas deben tener suficiente energía cinética debido a su velocidad y masa, como para pasar sobre dicha barrera. Si la barrera desaparece, entonces la interacción neta es totalmente atractiva, y consecuentemente, las partículas se aglomeran. Esta región interna es referida como la "trampa de energía", pues los coloides pueden considerarse como sistemas unidos por fuerzas de van der Waals.

Dependiendo pues de nuestros propósitos, es posible alterar el entorno del coloide para aumentar o disminuir la barrera energética. Varios métodos pueden ser usados para este propósito, tales como cambios en la atmósfera iónica, el *p*H o agregando compuestos activos para afectar directamente la carga de la partícula. En cada caso, la medida del potencial zeta indicará el efecto de la alteración, principalmente en su estabilidad.

En definitiva, lo que se establecen de este modo son las bases para que el árido silíceo cristalino pueda llegar a reaccionar químicamente en medio acuoso con la portlandita en estado de sobresaturación de la fase líquida del hormigón de cemento portland puro, y también lógicamente, con la cal apagada en sus diferentes variedades, aunque dicha reacción química sea muy lenta y necesite mucho tiempo para que se lleve a cabo, dado el estado eminentemente cristalino de dicho árido silíceo de partida y el estado coloidal inicial del producto de reacción que se forma entre ambos. Lo que justifica por tanto su adecuación para fabricar con cemento Pórtland puro, el hormigón poroso de la capa de rodadura de carreteras de tráfico pesado, entre otros muchos usos constructivos [31, 34]. En cambio con cemento Pórtland con adiciones puzolánicas y siderúrgicas en elevadas cantidades e incluso moderadas cantidades según sea el tipo [35], no. Dado que la portlandita de su la fase líquida no se encontrará nunca en estado de sobresaturación sino lógicamente, de subsaturación.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 5 a, b)

Análisis microscópico de morteros de CP y aditivo aireante: (a) con arena silícea y (b) con arena caliza. Obsérvese que en el mortero (a), las burbujas del aireante se encuentran todas ubicadas en la masa de la pasta del CP, mientras que en el mortero (b) un buen número de ellas se encuentran ubicadas también en la propia interfase "pasta de cemento ‹› árido calizo" (x 10)

En cambio si el árido es calizo, caso por ejemplo de la piedra caliza o calcita, $CaCO_3$, su naturaleza es calcárea por lo que su carácter químico es totalmente el contrario, es decir, *básico*, dado que como es sabido, se trata de una sal de base fuerte, la portlandita o hidróxido de calcio, $Ca(OH)_2$, y ácido débil, el ácido carbónico, CO_3H_2, cuya hidrólisis origina también una disolución alcalina. Lo que en cualquier caso la imposibilita en cualquier cantidad, para poder reaccionar químicamente del mismo modo en medio acuoso, con la portlandita ni con la referida cal apagada, ambas muy *básicas* también, motivo por el cual está especialmente proscrita para el mismo fin constructivo anterior, pero no en cambio, para fabricar hormigón en masa y armado del mismo modo que con el silíceo. Dado que además, esta otra naturaleza calcárea del árido calizo, pero sobre todo su carácter químico *básico* junto con su propia textura íntima granuda, menoscaban en la cuantía de su presencia, su contrastada calidad y *durabilidad* previstas que en cambio proporciona con el cemento portland puro y a igualdad de todo lo demás, el árido de naturaleza íntegramente silícea en su totalidad o de carácter químico *ácido*, y además, textura íntima totalmente contraria también, es decir, continúa, y por ende, compacta, lo que ha sido demostrado tanto en ensayos de campo a escala de investigación [36] como en obra real [31, 34].

Por otra parte, Kiyoshi Sawada [37] estudió la adsorción de ortofosfato sobre calcita y vaterita bajo variadas condiciones de la disolución y obtuvo como resultado que mientras la especie química adsorbida sobre la superficie de la vaterita estaba cargada negativamente con $[Ca^{2+}{\bullet}PO_4^{3-}]$, las especies químicas adsorbidas sobre la superficie de las partículas de calcita eran eléctricamente neutras, ya fueran concentraciones bajas en fosfato, $[(Ca^{2+})_3(PO_4^{3-})_2)]$, ó concentraciones altas en fosfato, $[(Ca^{2+})(HPO_4^{2-})]$, es decir, las especies químicas adsorbidas son enteramente diferentes entre vaterita y calcita, o sea, especies cargadas negativamente sobre la vaterita, y especies no cargadas sobre la calcita. Y el cristal de portlandita es también una especie química eléctricamente neutra, o sea, no cargada. De aquí la especial predilección de la portlandita por precipitar y crecer con rapidez en cristales hexagonales sobre la superficie de las partículas de calcita (que actuarían a modo de "cristales semilla" o "cristales de siembra"), orientados como se ha dicho antes, según su plano de clivaje.

Y una prueba de dicho fundamento químico, la aportaron en su día G.P. Tognon y S. Cangiano [38], quienes demostraron experimentalmente que según que fuera silíceo o calizo el árido utilizado, la *aureaola de transición a la* ZTI era muy diferente, véase la (F. 5).

La 'piel' del hormigón y la durabilidad

Las características específicas del hormigón en las proximidades de las superficies expuestas al exterior

Según Kreijger [39], la estructura de los primeros centímetros del hormigón próximos a sus paredes exteriores, o mal llamada "piel" del hormigón, está edificada por varias causas ligadas a su puesta en obra y al curado del hormigón: el efecto del encofrado, la segregación, la evaporación, la fisuración excesiva,..., da por resultado la aparición de gradientes, a veces importantes, en las principales propiedades del hormigón, cuando se considera desde su superficie externa a su interior.

Se puede deducir por tanto que la "piel" del hormigón así constituida en su superficie, es porosa, motivo por el cual es accesible a los agentes agresivos. Por otra parte, a lo largo de su envejecimiento, los ciclos de humedad y secado a los que esté sometido no harán sino aumentar su *porosidad*.

Todo lo anterior está considerado desde el punto de vista físico únicamente, sin embargo si se considera también y a la par desde el punto de vista estrictamente químico focalizándolo además para el caso del hormigón de cemento Pórtland puro, lo que se produce a la par es esto otro, y para explicarlo, se va a exponer en principio y de forma también somera en el siguiente apartado, el fundamento químico del ataque del anhídrido carbónico del aire, CO_2, al hormigón de cemento Pórtland con adiciones activas –HCPA– o *carbonatación*.

Ataque del Dióxido de Carbono, $CO_2(g)$, del aire a los hormigones de cemento Portland con Adiciones Activas -HCPA- : "carbonatación"

Este ataque químico, denominado comúnmente *carbonatación*, es uno de los procesos degenerativos más comunes y característicos de los hormigones de cemento aluminoso. No obstante,

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

desde la aparición en el mercado de los cementos Portland con adiciones activas y no activas o mal llamadas "inertes" en sustitución de los cementos Portland puros o tradicionales, en igualdad de condiciones y para idénticos usos constructivos, este proceso también está afectando a los hormigones de cemento Portland con adiciones activas (HCPA) en general, y con cenizas volantes, puzolanas naturales, arcillas activadas, esquistos calcinados, humo de sílice (en sus respectivas cantidades de uso más comunes), escorias siderúrgicas (en cantidades elevadas, especialmente) y no activas o "filler" (y si es calizo, más aún, lógicamente), en particular, pero por diferente fundamento y reacciones químicas. Y todo ello a pesar de que paradójicamente la *carbonatación* haya constituido y constituya un medio de protección natural bastante eficaz de los hormigones de cemento Portland puro, siendo además el fundamento de su contrastada estabilidad y *durabilidad* mostradas ante la acción natural del CO_2 del aire. De aquí que no es deseable denominar a dicha acción natural del CO_2 del aire "ataque agresivo para el hormigón", ya que ello dependerá más de las características y composición del propio hormigón sobre el que actúe, pero sobre todo, del tipo de cemento que lo constituya, que de las del propio CO_2 (constantes para una condición determinada de humedad, presión y temperatura).

El fundamento de la nocividad de la *carbonatación* de algunos HCPA se basa en que el dióxido de carbono, CO_2, junto con la humedad, ambiental o no, penetra en la pasta hidratada de cemento por la red de fisuras, microfisuras, poros, microporos, capilares, e incluso, por la propia zona de transición a la interfase árido-pasta, máxime si el árido es calizo, originando finalmente la *carbonatación* de la portlandita, $Ca(OH)_2$, liberada en la hidratación de su fracción clinker Portland, y también, del resto de sus componentes sólidos, tales como el gel CSH, aluminatos, Fase *AFt* y/o *AFm*, etc, mencionados antes en el apartado 2.1.

Este fenómeno de *carbonatación* ocurre en una gran variedad de condiciones. La atmósfera contiene aproximadamente 380 ppm de $CO_2(g)$, lo que equivale a una presión parcial de $CO_2(g)$ de $3{,}55 \cdot 10^{-4}$ bares. Si en estas condiciones, de presión parcial de $CO_2(g)$ relativamente alta, el proceso de *carbonatación* llegase hasta su final se tendría que todas las fases constituyentes del cemento Portland habrían reaccionado produciendo mezclas de carbonato de calcio y de otros

CONTROL	P_{CO_2} APROXIMADO A 25º C [bar]
$CaCO_3$ (sólido con $Ca(OH)_2$ para tamponar el *p*H)	$7{,}39 \cdot 10^{-14}$
Atmosférico (estándar)	$3{,}55 \cdot 10^{-4}$
Atmosférico (acelerado)	1 (sin presurización)
CO_2 supercrítico	50

(T. 4) Intervalos de presión parcial de CO_2 relevantes para los sistemas de base cemento

sólidos. Pero la reacción puede ocurrir en un gran intervalo de presiones parciales de $CO_2(g)$, tal y como se muestra en la Tabla 4 (T. 4) [40].

El proceso de *carbonatación* no tiene per se un efecto negativo sobre las propiedades de la pasta de cemento. En algunos casos, la *carbonatación* puede incluso dar por resultado una reducción de la *porosidad* del material favoreciendo además la formación de una capa protectora en la superficie del hormigón [41].

Pero eso sólo ocurre si la fase líquida de la pasta cementante de dicho hormigón, está permanentemente sobresaturada de portlandita (lo que se consigue siempre mediante cualquier cemento Portland puro (F. 6 a) y con escorias siderúrgicas en cantidades bajas y moderadas a lo sumo según el tipo [35]), en cuyo caso, nada más retirar el encofrado, se seca primero dicha superficie provocando la precipitación inmediata de la portlandita (el soluto de la fase líquida de los poros de dicha pasta de cemento Portland, que se encontraba momentos antes en estado de sobresaturación) en forma de placas hexagonales que precipitadas in situ (planarmente,

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

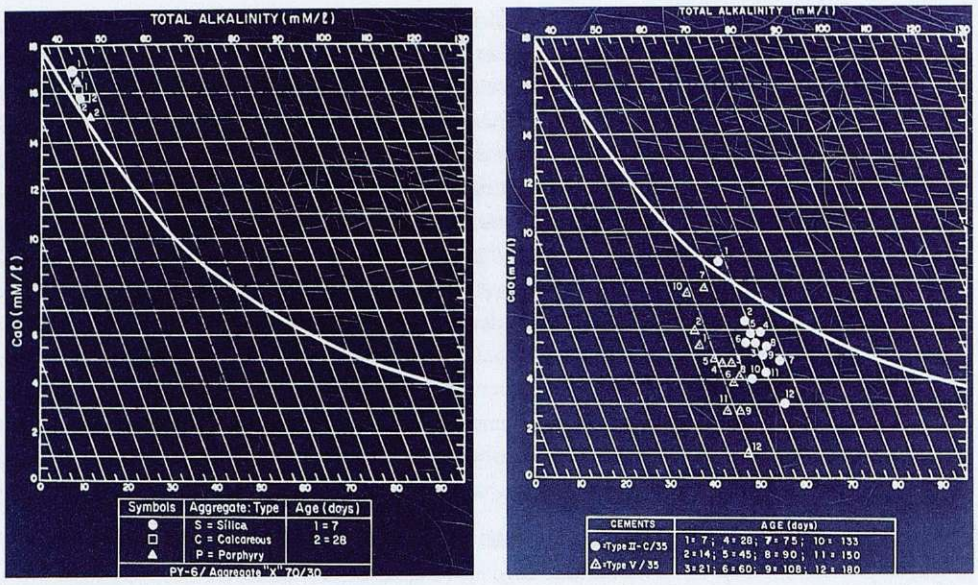
(F. 6 a, b)

Ensayo de Frattini

a) del CPRS PY-6 (79,5% C_3S y 0% C_3A) con cuarzo, caliza y y pórfido molidos, en las proporciones 70%/30%. Sus fases líquidas están sobresaturadas en $Ca(OH)_2$ a las edades de 7 y 28 días

b) CPO con adiciones puzolánicas (CV y/o PN) para hormigón estructural, pavimentos rígidos y presas

Edades: 7, 14, 21, 28, 45, 60, 75, 90, 108, 133, 150, y 180 días. Sus fases líquidas se encuentran subsaturadas en $Ca(OH)_2$ a todas les edades, menos a la edad de 1 día del cemento II/C 35 que está sobresaturada, lo que resulta no obstante intrascendente para impedir también su degradación prematura por carbonatación negativa de su correpondiente mortero u hormigón armado, si no se toman las medidas preventivas que la dificulten e incluso impidan



una encima de la otra y de forma compacta, sobre la cara vista superior de la pieza de hormigón de cemento portland puro, y en forma de maclas irregulares pero muy compactas también sobre la correspondiente cara vista inferior u opuesta de dicha pieza) y por acción del CO_2 del aire, he aquí la paradoja, se transforman en muy poco tiempo en las correspondientes placas hexagonales de calcita sintética (F. 7 a), la cual constituye en definitiva, el componente principal de dicha capa protectora del hormigón de cemento Portland, hasta el punto de poderle denominar, ahora sí, la "piel" del hormigón de cemento Portland (y Portland con escorias siderúrgicas en cantidades bajas y moderadas a lo sumo según el tipo [35]), merced a su "marmolización artificial y superficial" por efecto de su *carbonatación* "positiva"; véase la (F. 6 a) cuya justificación son los resultados de la (F. 7 a).

Pero continuando con el símil de la "piel" pero en este caso de la "piel humana", representada en la (F. 8) de forma esquemática, dicha "piel" del hormigón de cemento Pórtland, se correspondería en realidad con la "epidermis humana", aunque debida a su referida "marmolización artificial"; el 1er. milímetro de hormigón contado a partir del fin de dicha "epidermis" se correspondería en realidad con la "dermis", mientras que el 2º milímetro y algunos más siguientes en profundidad, se corresponderían con la "hipodermis".

Sin embargo, si dicha fase líquida de la pasta cementante del hormigón no se encuentra en estado de sobresaturación permanente de portlandita sino de sub-saturación también permanente, por la presencia de adiciones puzolánicas, en las cantidades que les son propias a cada tipo, o de adiciones siderúrgicas en elevadas cantidades, o dicha pasta cementante es demasiado microporosa por la presencia en ella de filler calizo preferentemente en elevadas cantidades también [2], o por la retracción hidráulica e incluso térmica (y por secado) que comportan según sea el carácter químico de la adición puzolánica [3, 4] [42], al haber sido elevada la relación agua-cemento utilizada a pesar de que su trabajabilidad haya sido adecuada (hecho éste muy común en la fabricación de este tipo de hormigones), motivan en definitiva que los HCPA sean susceptibles química y físicamente de sufrir este ataque químico. En cambio a los correspondientes hormigones de cemento portland puro, HCP, y a igualdad de todo lo demás, no sino todo lo contrario. Ya que dicha *carbonatación* les proporcionan resultados positivos. De aquí que para diferenciarla de la anterior, se le ha denominado *carbonatación* "positiva", para así poder diferenciarla claramente de la "negativa" referida antes, la cual y de acuerdo con el símil de la piel humana mencionado [43], se les produce en definitiva a los HCPA, porque éstos a pesar de que poseen también "hipodermis" y "dermis", les falta la "epidermis" que es la más importante de las tres capas.

Porque los HCPA, a diferencia de los HCP, al retirarles el encofrado, la fase líquida de su pasta cementante con adiciones puzolánicas en cantidades moderadas y más aún elevadas, acaba por no encontrarse más pronto o más tarde, en estado de sobresaturación permanente de portlandita sino de subsaturación (F. 7 a), por lo que no se producirá por aireación y secado precipitación alguna de portlandita hexagonal, y si en cambio, su reacción química con el CO_2 del aire,

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 7 a, b)

a) Carbonatación positiva: Maclas compactas de calcita sintética, otrora portlandita de la pasta de cemento CEM I 42,5N, conservada bajo agua 4 años y expuesta a continuación al aire del laboratorio

b) Carbonatación negativa: Granos masivos de calcita sintética, de aspecto terroso, desagregados y textura íntima granuda, procedentes de una grava-cemento muy carbonatada. Obsérvese con atención las notables diferencias morfológicas y cristalográficas de ambos tipos de calcitas sintéticas





pero para originar esta vez bicarbonato de calcio, $Ca(HCO_3)_2$, al ser el pH de dicha disolución muy inferior al de la disolución sobresaturada de portlandita (≈ 12,3 a 12,5), según la reacción química [r16] preferentemente: $Ca(OH)_2 + 2\ CO_3H_2 \rightarrow Ca(CO_3H)_2 + 2\ H_2O$ [r16]. Para más detalle, véase la (F. 9).

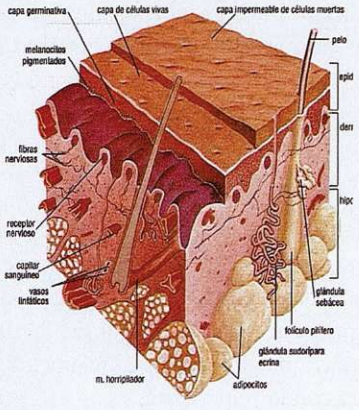
Dicho bicarbonato de calcio, como ya se ha venido diciendo, a diferencia de la forma carbonato, $CaCO_3$, es muy soluble en agua; lo que facilita su pérdida por lixiviación, cuya nocividad para el hormigón es conocida por todos.

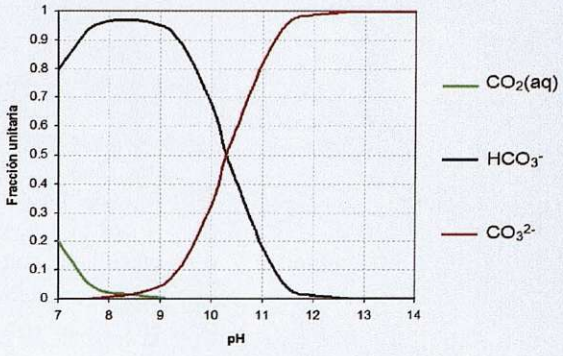
(F. 8)

La piel humana de forma esquemática. Obsérvese en ella la epidermis, la dermis y la hipodermis o tejido celular subcutáneo

(F. 9)

Distribución relativa de CO_2(aq), HCO_3^- y CO_3^{2-} en función del *p*H a 25° C





Además y al igual que ocurre con las "eflorescencias" de los ladrillos, dicho bicarbonato de calcio disuelto en el agua de los poros de la pasta cementante del hormigón puede:

- emigrar hacia la superficie de dicho hormigón, al calentarse ésta por acción de los rayos solares, y/o por difusión por gradiente de concentración, entre otras posibles causas, acabando por descomponerse en dicha superficie exterior al evaporarse el disolvente, agua, por el calor solar y/o por el aire (acción favorable de la temperatura y/o del viento, respectivamente), en CO_2, H_2O y carbonato de calcio –según esta otra reacción química, $Ca(HCO_3)_2 + Calor \rightarrow CaCO_3 + CO_2 + H_2O$ [r17]–, que precipita en forma de agregados granulares masivos o terrosos, pero en definitiva, desagregados, véanse en la (F. 7 b) (cuya justificación son los resultados de la (F. 6b)) y compárense con los de la (F. 7 a) (fenómeno éste que algunos autores le denominan "eflorescencias" del hormigón pero que se diferencian claramente de las referidas "eflorescencias" de los ladrillos, en que estas últimas, una vez precipitadas por secado en las superficies externas de las ladrillos, pueden ser de nuevo re-adsorbidas por capilaridad a su interior por el efecto contrario, el agua de lluvia, dado que el soluto, soluble en agua, motivo de la "eflorescencia" del ladrillo en este caso, no ha cambiado); además, la transformación en la superficie del hormigón de la portlandita en carbonato de calcio, crea un desequilibrio químico en los poros abiertos al exterior traducible rápidamente en un gradiente de concentración de portlandita dC/dx:

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

la evolución del sistema hacia el equilibrio entraña la difusión de la portlandita hacia la superficie. La 1ª Ley de Fick da la relación entre la transferencia de portlandita y el gradiente de concentración correspondiente: $J_x = -D_f (dC/dx)$, donde el coeficiente de difusión D_f expresa para una temperatura dada, el número de moles que difunden por unidad de tiempo a través de una superficie unitaria y para un gradiente de concentración igualmente unitario. La expresión de Fick pone bien en evidencia que la difusión de la portlandita en superficie es proporcional al gradiente de concentración, o también,

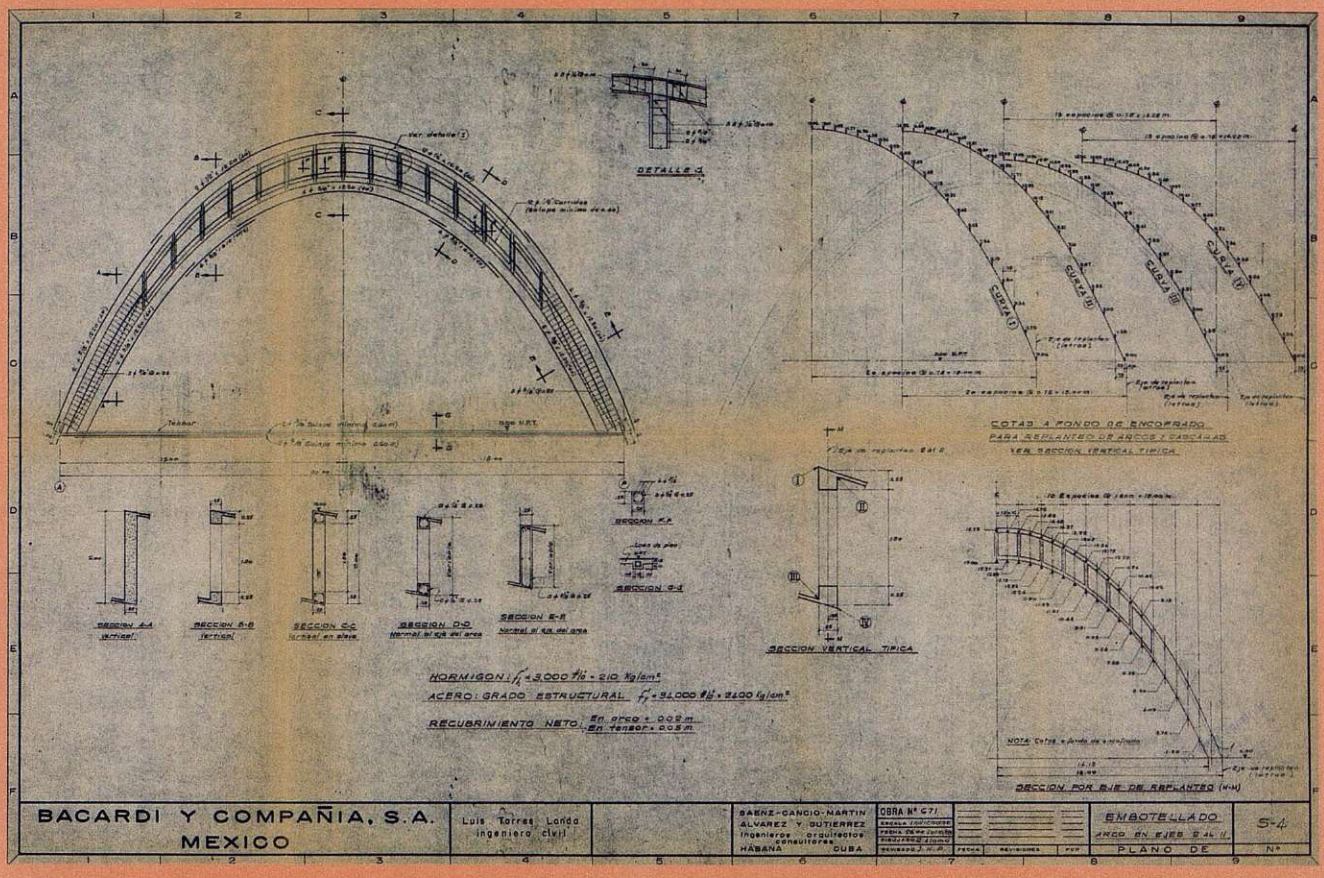
- el bicarbonato de calcio de la fase líquida de un poro profundo puede entrar en contacto con más disolución acuosa más subsaturada aún de *portlandita* (fruto de la actividad puzolánica desarrollada con el transcurso del tiempo por la fracción de puzolanas incorporadas o equivalente en el caso de las escorias siderúrgicas en elevadas cantidades sobre todo), en el lugar inmediato más interior de dicho poro, y reaccionar con ella, según esta otra reacción química: $Ca(CO_3H)_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow Ca(CO_3) + 2H_2O$ [r18], para originar de este otro modo, carbonato de calcio que es también desagregado y terroso (F. 7 b).

No obstante y pese a todo, se ha de convenir que el proceso de *carbonatación* negativa de los HCPA es mucho más complejo todavía. Ya que se lleva a cabo mediante reacciones químicas en las que los iones alcalinos, Na^+ K^+, aportados por la adición puzolánica y/o siderúrgica y/o fíller junto con los del propio cemento portland, juegan también un papel fundamental en dicho proceso degradativo, pero dado el fin último de este artículo, no se ha considerado necesaria su justificación con tanta precisión química.

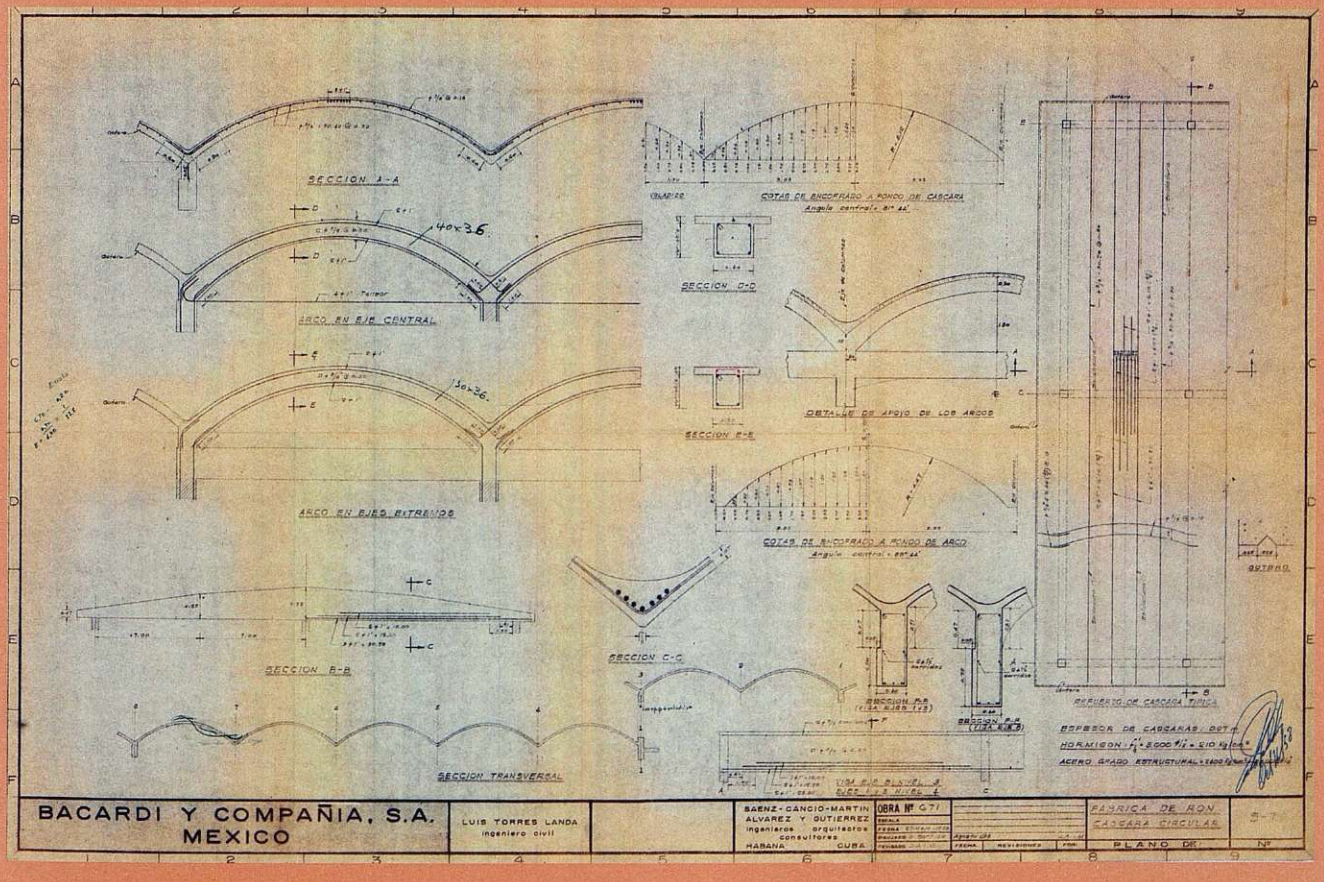
En resumen, lo que promueve y facilita la degradación prematura por *carbonatación* negativa, del hormigón de cemento portland con adiciones activas (puzolánicas –en las cantidades que les son propias a cada una de ellas [1, 2]– y siderúrgicas –en cantidades elevadas [2] e incluso quizás moderadas según sea el tipo [35]–, y no activas, fíller, –en las cantidades que también le son propias [2]–), es que la portlandita se encuentre permanentemente en estado de subsaturación en su fase líquida o también que se lixivie en demasía, pero en cualquier caso, es incapaz de formar la "epidermis" del hormigón o su "marmolización artificial" referida antes.

Luego si desde la perspectiva de la vigente Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 [1], toda la magna obra de Félix Candela, o casi toda ella, aún continúa en estado de servicio, su *durabilidad* está resultando ser sencillamente extraordinaria. Y de este tan extraordinario comportamiento mostrado por la misma, se ha de deducir por tanto necesariamente, que al igual que Eduardo Torroja, la debió construir con hormigón armado de cemento Pórtland puro, árido silíceo (grueso y fino) y agua (adecuadamente dosificados), cemento portland puro que, no se olvide, está constituido únicamente por clínker portland y regulador de fraguado: piedra de yeso natural molida en cantidad óptima [44].

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 10 a)



(F. 10 b)

(F. 10 a, b)

Planos de la Fábrica Bacardí, Cuautitlán, México, 1958
(cesión/*dealership* Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM)

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Referencias

[1] *Instrucción de Hormigón Estructural. EHE 08*: Comisión Permanente del Hormigón, 2ª edición, Madrid, Ministerio de Fomento. Edita: Centro de Publicaciones, 2009, Secretaria General Técnica.

[2] *Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08* (R.D. 956/2008, de 6 de junio, BOE nº 148, 19 de junio de 2008).

[3] Talero R.: "Contribución al Estudio Analítico y Físico-Químico del Sistema: Cementos Puzolánicos-Yeso-Agua (a 20±2°C)", Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, Ftad. CC. Químicas, 20 nov. 1986.

[4] Talero R.: "Patología del Hormigón: Su destrucción galopante por ataque del yeso: 2ª Terapia Preventiva – Predicción del comportamiento de una adición puzolánica dada", ciclo de conferencias sobre: aplicaciones, patologías y terapias de estructuras, hormigón y otros materiales de construcción, pp. 347-367, Zaragoza, 1991.

[5] Norma UNE 146507-1: 1999 EX: "Ensayos de áridos. Determinación de la reactividad potencial. Método químico. Parte 1: Determinación de la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato", AENOR, Madrid.

[6] Norma UNE 146508 EX: "Ensayos de áridos. Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice y álcali-silicato. Método acelerado de las barras de mortero", AENOR, Madrid.

[7] Norma UNE 146509 EX: "Ensayos de áridos. Determinación de la reactividad potencial de los áridos con los alcalinos", AENOR, Madrid.

[8] ASTM C563-03: "Standard Test Method for Optimum SO_3 in Hydraulic Cement Using 24-h Compressive Strength".

[9] Talero R.: "Patología del Hormigón: Su destrucción galopante por ataque del yeso: 2ª Terapia Preventiva – 'Óptimo de SO_3'. Su determinación", ciclo de conferencias sobre: aplicaciones, patologías y terapias de estructuras, hormigón y otros materiales de construcción, pp. 333-346, Zaragoza, 1991.

[10] Taylor H.F.W.: *La Química de los Cementos*, vol. I, URMO S.A. de Ediciones, Bilbao, 1978.

[11] Powers T.C., Brownyard, L.C.: "Studies of the physical properties of hardened portland cement paste", PCA Bulletin 22, 1948.

[12] Feldmanm R.F., Sereda P.J.: "A new model of hydrated cement and its practical implications". Eng. J. Can., 53, pp. 53-59, 1970.

[13] Wittman F.H.: "Bestimmung physikalischer Eigenschaften des Zementsteins", Deutscher Ausschuss fuer Stahlbeton, Heft 232:1-63, W.Ernst & Sohn, Berlín (Alemania), 1974.

[14] Wittman F.H.: "Creep and shrinkage mechanism in concrete", Creep & Shrinkage of Concrete, Ed. Z.P. Bazant/F.H. Wittman, J.Wiley & Sons, Nueva York (EEUU), 1988.

[15] Jennings H.M.: "A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste", Cem. Concr. Res., 30 [1], pp. 101-116, 2000.

[16] Tennis P.D., Jennings H.M.: "A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of portland cement pastes", Cem. Conr. Res., 30 [14], pp. 855-863, 2000.

[17] Jennings H.M.: "Colloid model of CSH and implications to the problem of creep and shrinkage", Mater. Struct., 265, pp. 59-70, 2004.

[18] Grutzeck M.W.: "A new model for the formation of calcium silicate hydrate (CSH)", Mat. Res. Innov., 3 [11], pp. 160-170, 1999.

[19] "Applied micromechanics of porous materials", CISM Courses and Lectures No. 480, International Centre for Mechanical Sciences, Ed. L. Dormieux/F. J. Ulm. Springer Wien, Nueva York, 2005.

[20] Delgado A.: "Contribución al estudio de la interfase árido-pasta de cemento Portland", Tesis doctoral en fase de realización. Director: R. Talero.

[21] Lannegrand R., Ramos G., Talero R.: "Estado del conocimiento sobre la sal de Friedel", Mater. Construcc., 51 (262), pp. 63-71, 2001.

[22] Jones M.R., Macphee D.E., Chudek J.A., Hunter G., Lannegrand R., Talero R., Scrimgeour S.N.: "Studies using 27Al MAS NMR of AFm and AFt phases and the formation of Friedel´s salt", Cem.Concr.Res., 33 [14], pp. 177-182, 2003.

[23] Rahhal V., Talero R.: "Early hydration of portland cement with crystalline mineral additions", Cem-Concr. Res., 35 [7] , pp. 1285-1291, 2005.

[24] Rahhal V., Bonavetti V., Delgado A., Pedrajas C., Talero R.: "Scheme of the portland cement hydration with crystalline mineral admixtures and other aspects", Siliactes Industriels, 74 [11-12], pp. 347-352, 2009.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

[25] Rahhal V., Bonavetti V., Delgado A., Pedrajas C., Talero R.: "Role of the fíller on Pórtland cement hydration at early ages", In Concreto (aceptado para publicación, en prensa), Italia.

[26] Cohen M.D., Mather B.: "Sulfate Attack on Concrete-Research Needs", aci Mater.J., 88 [1], pp. 62-69, 1991.

[27] Feldman R.F.: "Influence of condensed silica fume and sand/cement ratio on pore structure and frost resistance of portland cements mortars", Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Procs. 2nd Intern. Conf., Madrid, 1986; V.M. Malholtra, Ed., ACI, SP-91, 2, 973-989.

[28] Powers T.C.: "Structure and physical properties of hardened portland cement paste", J. Amer. Ceram. Soc., 1958, 41, 1, 1-6.

[29] Richet C., Oliver J.: "La difusión de l´eau tritiée dans les pâstes de ciment et les mortiers", Comunicación privada.

[30] Zeta-Meter, Inc.: "Coagulation & Floculation", 1993.

[31] Bollati M.R., Talero R., Rodríguez M., Witoszek B.: "Porous concrete of high performance for roads traffic". Concrete in the Service Making-Int. Congress, Proceedings, Dundee, Scotland, junio, 1996.

[32] Bollati M.R., Talero R., Rodríguez M., Witoszek B., Solis L.A.: "Hormigón poroso de altas prestaciones como capa de rodadura para trafico pesado". Congreso Mundial de Carreteras, Proceedings, Toronto, Canadá, junio, 1997.

[33] DIT 400 y DIT 400/R: "Sistemas de impermeabilización intemper tf para cubiertas: tf básico, tf mixto, tf aljibe, tf ecológico y tf ecológico aljibe", IETcc (21 de diciembre de 2002) e IETcc (29 de abril de 2004). Registro de la modificación del DIT 400, que incluye correcciones tipográficas, actualización de normativas y texto de puesta en obra.

[34] DIT 400R-09: "Impermeabilización y aislamiento térmico de cubiertas. Sistema intemper tfr con lámina renofhol cg y losa filtrón: tf básico, tf mixto, tf aljibe, tf ecológico y tf ecológico aljibe", intemper española, s.a., Madrid, *http://www.intemper.com*.

[35] NF P 18-506: "Additions pour béton hydraulic. Laitier vitrifié moulu de haut-fourneau", afnor, 1992.

[36] Calleja J., Aguanell M.: "Consideraciones sobre el ensayo de ansttet y el comportamiento de los cementos frente a los sulfatos", Mater. Construcc., Nº 179, págs. 39-48, 1980.

[37] Sawada K.: "The mechanism of crystallization and transformation of calcium carbonates", Pure & Appl. Chem., Vol. 69, No. 5, pp. 921-928, 1987.

[38] Tognon G.P., Cangiano S.: "Interface phenomena and durability of concrete", 7th Intern. Congress on the Chemistry of Cement, vol. III, pp. VII-133 – VII-138, París, 1980.

[39] Kreijger P.C.: "The skin of concrete. Composition and properties", Máster Constr. rilem, 17 (100), 275-283, 1984.

[40] Glasser F.P., Matschei T.: "Interaction between Portland Cement and Carbon Dioxide", 12th Intern. Congress on Chemistry of Cement, TH3-13.4, Montreal, Canadá, julio 8-13, 2007.

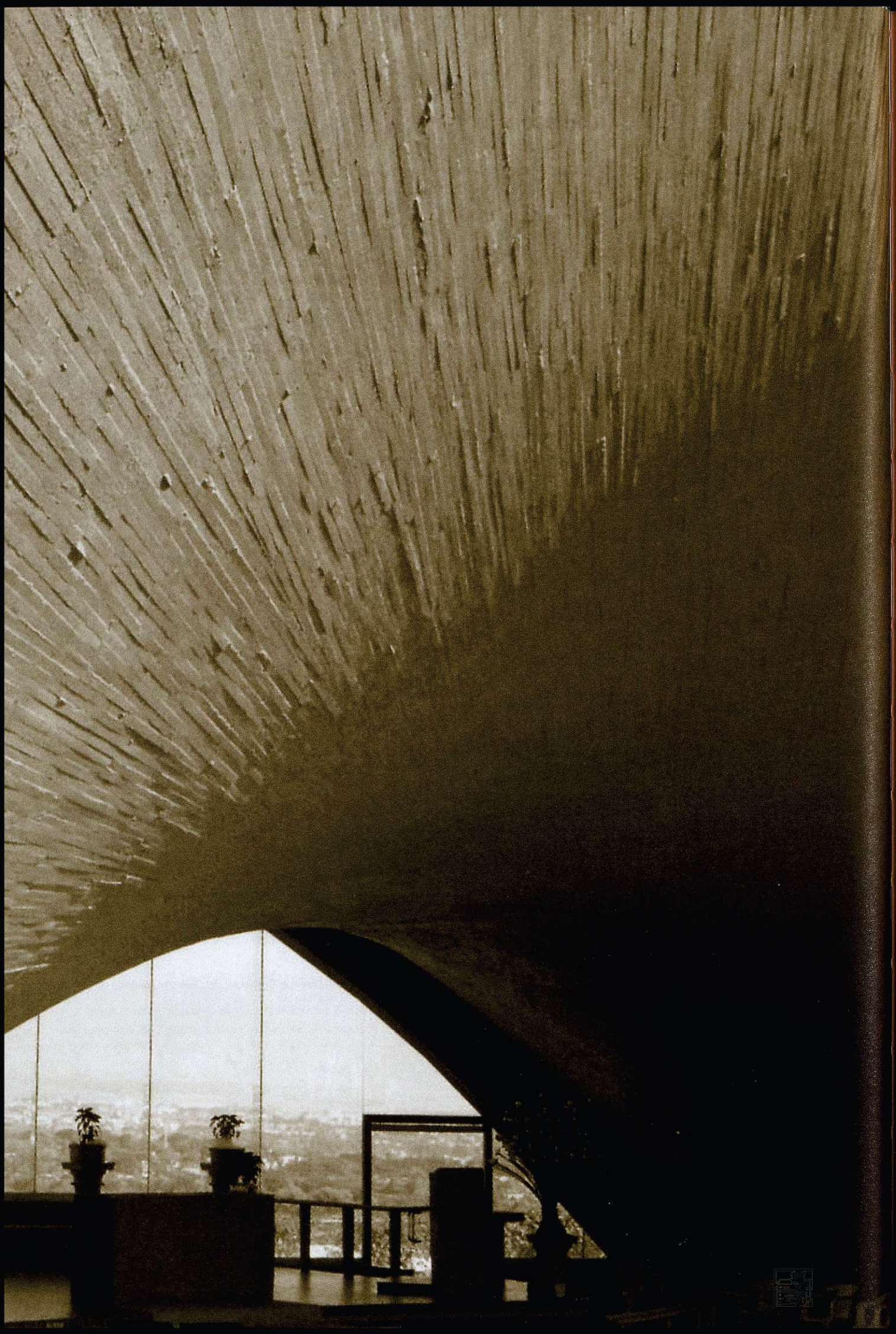
[41] Glasser F.P., Marchand J., Samson E.: "Durability of Concrete-Degradation Phenomena Involving Detrimental Chemical Reactions", Conferencia Magristral, 12th Intern. Congress on Chemistry of Cement, thpl-1, Montreal, Canadá, julio 8-13, 2007.

[42] Rahhal V.: "Caracterización de las Adiciones Puzolánicas por Calorimetría de Conducción", Tesis Doctoral, ets de Ings. de Caminos Canales y Puertos, Univ. Politécnica de Madrid, 12 de dicicembre de 2002. Director de la Tesis: R. Talero.

[43] *Atlas Ilustrado de Anatomía*, Giunti Gruppo Editoriale Forenze, Susaeta Ediciones s.a., Madrid.

[44] ASTM C 563-95 Standard: "Standard Test Method for Optimum SO_3 in Hydraulic Cement Using 24-h Compressive Strength", Annual Book of astm Standards, Section 4 Construction, Vol. 04, Cement, Lime, Gypsum, 1995.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



6 FÉLIX CANDELA
FELIX CANDELA

La formación de Candela
Ricardo Aroca Hernández-Ros

Félix Candela, una mirada muy cercana
Antonia Candela Martín

Félix Candela: memoria y recuerdos
Julia Gómez Candela

Félix Candela: del hombre y su obra
Juan B. Artigas

Homenaje a Félix Candela
Fernando Serrano Migallón

La huella de Candela
La arquitectura con las estructuras
José Ávila Méndez

Capilla abierta en Lomas de Cuernavaca
Morelos, México, 1959

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

La formación de Candela

Ricardo Aroca Hernández-Ros
Dr. Arquitecto. Catedrático del Departamento de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Arquitectura ETSAM
Universidad Politécnica de Madrid UPM, España

Félix Candela era un hombre modesto, con esa modestia hija del orgullo que sólo pueden permitirse quienes tienen la seguridad de saberse superiores y no tienen por qué demostrar su auténtica valía.

En ese sentido, salvando las distancias (en algunos aspectos, como la conciencia política, enormes), me aparece en la misma clase de personas que Alejandro de la Sota y Miguel Fisac, algo más jóvenes que él, y también poseedores de un enorme ego en un cuerpo pequeño e igualmente adeptos a menospreciar "de boquilla" la importancia de su obra.

Candela decía que él sólo había intentado hacer cosas baratas y sencillas y que se le daba una excesiva importancia, pretendiendo incluso dar la impresión de que su obra se debía más a la intuición que al conocimiento.

Nada más lejos de la realidad. Félix Candela poseía una enorme intuición que no era sino la decantación de un profundo conocimiento adquirido a través de una rigurosa formación, años de intenso estudio y una amplísima experiencia práctica, que le permitió, viendo sólo los planos de concurso, pronosticar que las cáscaras de Utzon para la Ópera de Sidney eran imposibles (Jenkins llegó a la misma conclusión después de varios intentos fallidos de proyectar la estructura).

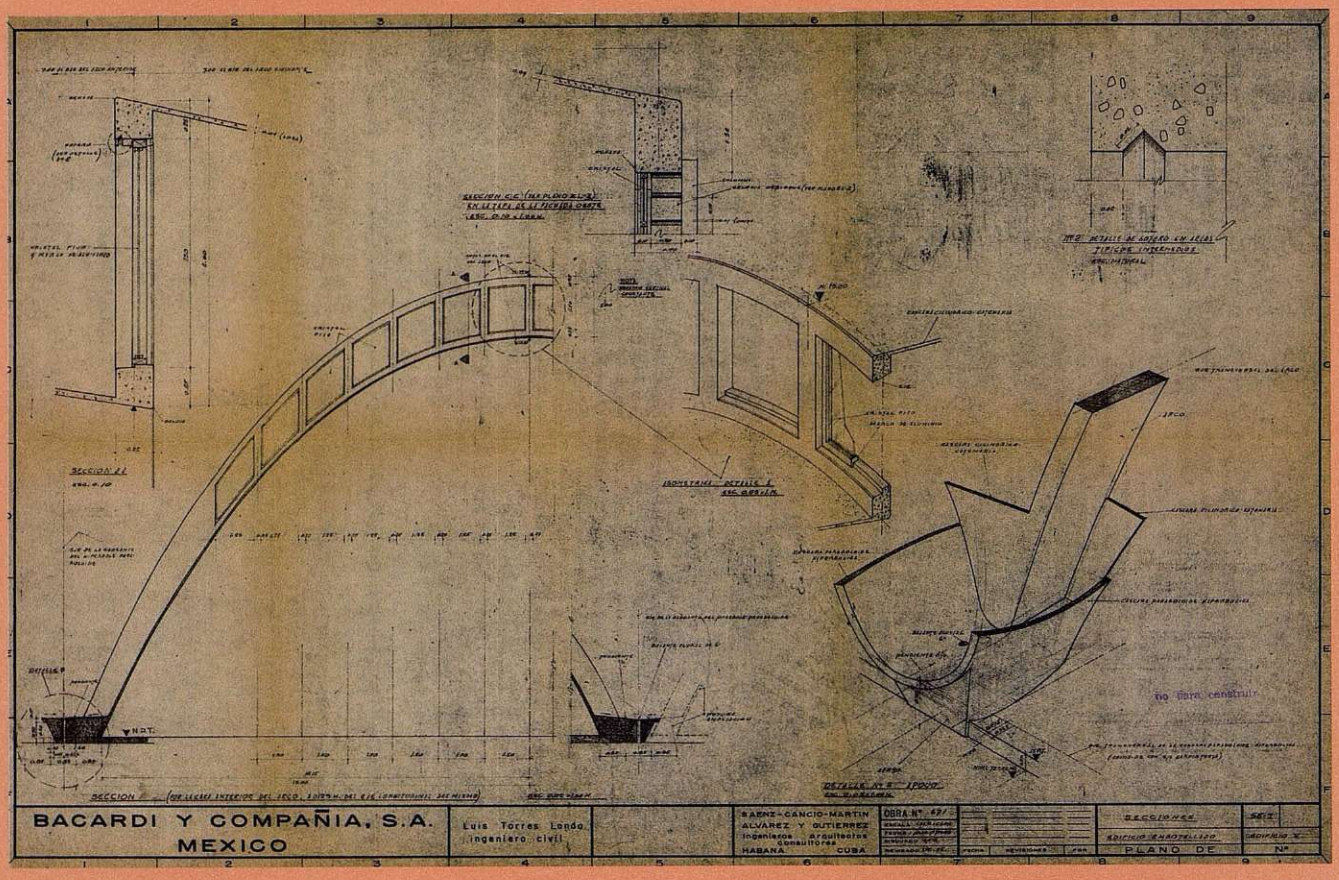
Félix Candela, en los años 30, estudió arquitectura en la Escuela de Arquitectura de Madrid (hoy integrada en la Universidad Politécnica), en la que se impartía una rigurosa formación en el campo de las estructuras: El catedrático de análisis estructural en los años 30, Luis Vegas, era uno de los introductores de la Teoría de la Elasticidad en la enseñanza en España. En sus últimos cursos y una vez terminada la carrera, Félix Candela fue ayudante de Luis Vegas, junto a Antonio García de Arangoá, quien después de la Guerra Civil sucedió en la cátedra a Luis Vegas, muerto en los avatares de la contienda.

Félix Candela, que era el ayudante más brillante e inquieto, consiguió una beca para ampliar conocimientos estructurales en Alemania con Dischinger, el teórico puntero en el análisis de estructuras laminares. El 18 de julio de 1936, Candela iba a tomar el tren para Berlín, pero ante los acontecimientos decidió que su deber como ciudadano era permanecer en España y colaborar en la defensa de la legalidad republicana, lo que finalmente acabó conduciéndolo al exilio en México, y para empeorar las cosas sin el título de Arquitecto, que no se había molestado en recoger, lo que le impidió ejercer allí su profesión (años más tarde intentó recogerlo una hermana y en la Escuela se negaron a dárselo).

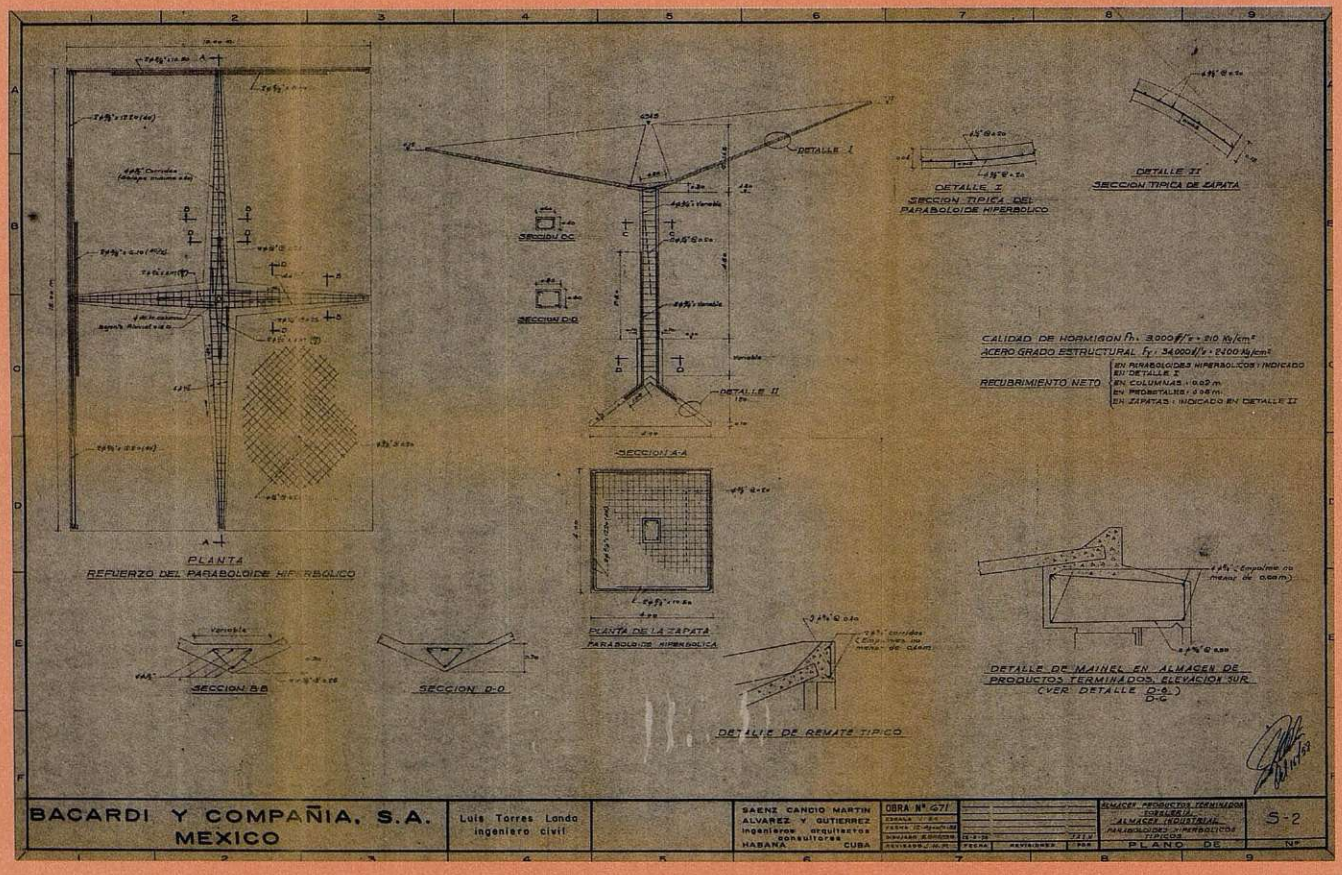
En sus primeros años en México, se dedicó a estudiar por su cuenta los libros que pudo conseguir, de forma que su bagaje teórico era considerable cuando empezó a abrirse camino como constructor, primero en proyectos de otros, ofreciendo alternativas novedosas más baratas, y más tarde en proyectos propios firmados por otros, ya que carecía de la capacidad legal para suscribirlos, capacidad que sólo le fue reconocida por el gobierno mexicano poco antes de abandonar el país camino de EEUU.

En los años 40, el problema teórico del análisis de láminas estaba resuelto; subsistían, no obstante dos problemas reales: en primer lugar la solución del sistema de ecuaciones en derivados parciales, que sólo era resoluble para los esfuerzos de membrana y sólo para formas geométri-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 1 a)



(F. 1 b)

(F. 1 a, b)

Planos de la Fábrica Bacardí, Cuautitlán, México, 1958
(cesión/*dealership* Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM)

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

cas con expresiones analíticas sencillas, y, aun para éstas, que las tensiones consecuencias de la rigidez a flexión de la lámina y de las condiciones de contorno, no podían tratarse más que de forma aproximada.

Resueltos u obviados los problemas analíticos, quedaba la construcción (como definir y asegurar la forma), la puesta en obra de materiales, etc.

El camino que siguieron los constructores europeos, como Torroja y Hossdorf, fue la experimentación en modelos reducidos, lo que obviamente estaba fuera de las posibilidades del modesto expatriado y de su país de acogida.

Jugaban en cambio a su favor otros factores:

- El bajo coste de la mano de obra, que favorecía las soluciones estructurales con poco acero y hormigón, aunque requirieran encofrados complejos.
- La inexistencia de normativa, lo que dejaba amplio campo a la audacia que le permitía comprobar en modelos a tamaño real cuestiones tales como que el "paraguas" de cuatro paraboloides que aparece en los textos de Flügge como inconstructible (ya que, según demuestra, la membrana no puede soportar el peso de los nervios de borde) era viable, siendo el efecto real perfectamente asumible, si se buscaba una solución de nervios de poco peso.
- La bondad del clima, que permitía obviar el aislamiento térmico y la impermeabilización, factores ambos que impiden explotar la rotunda expresión interior y exterior de la lámina de hormigón.

El paraboloide hiperbólico presentaba dos ventajas básicas respecto a otras formas simples: su expresión analítica $z = kxy$ es la más sencilla posible y, por si fuera poco, puede realizarse el encofrado empleando tablas rectas (si bien es verdad que de anchura no constante) lo que facilita la construcción y el armado.

Tiene el inconveniente de no ser una forma fácil de manejar como elemento arquitectónico, y ahí en la obra de Candela se puede seguir el progresivo dominio de la forma geométrica: los ejes se inclinan, los paraboloides se hacen asimétricos y se combinan, juega con las condiciones de borde...

La producción mexicana de Candela fue extraordinaria en cantidad y calidad, aunque algunas de las obras han envejecido mal por las deformaciones diferidas, las filtraciones de agua y la carbonatación del hormigón (desconocida entonces), con la consiguiente pérdida de protección de las armaduras (los espesores totales eran de 40 a 50 mm, lo que dejaba las armaduras con un revestimiento insuficiente).

Algunas láminas adolecen de picos algo doblados y muchas están afeadas por parches de chapapote (alquitrán) para remediar filtraciones de agua.

Nada de ello empaña la fantástica epopeya del expatriado, que con la confianza que le da el haberse formado en una institución de primera línea, ha seguido estudiando y sabe lo que se puede saber; se atreve a hacer uso no sólo de sus conocimientos sino de su intuición, y produce una obra que asombra al mundo. El exilio en cierto sentido, pese a las penalidades personales, fue una bendición para Candela, que supo convertir la tragedia en oportunidad. De haber permanecido en España difícilmente la dureza y mezquindad de nuestra sociedad hubiera, no ya propiciado, ni siquiera permitido la fantástica eclosión de su talento (sin ir más lejos, la utilización de su nombre, cuando ya había muerto, por los promotores del Oceanogràfic valenciano es un insulto a su memoria).

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Félix Candela, una mirada muy cerca

Antonia Candela Martín
Dra. en Ciencias por el Cinvestav, México
Hija de Félix Candela



(F. 1)
Papá y yo, México, 1948

Escribir sobre mi padre es para mí motivo de enorme orgullo y al mismo tiempo una tarea muy difícil por la cantidad de emociones que me produce. Me centraré en los aspectos más personales de Félix Candela, pues muchos otros tienen mejores bases para hablar de su obra como arquitecto.

Empezaré por plantear que Félix Candela fue un hombre de rutinas, muy hogareño pero poco preocupado por los asuntos de la vida cotidiana de la casa, tarea que dejaba completamente en manos de nuestra madre que la hacía con gran autoridad y placer. Él nos llevaba casi siempre a la escuela, se iba a trabajar y después nos recogía para ir a comer a casa y hablar de lo que había hecho en el día, cómo iban las obras, sobre los arquitectos con los que se relacionaba, sobre la oficina (Cubiertas Ala), mientras comíamos los "potajes de pobre", como él decía, y que tanto disfrutaba, como el arroz blanco con frijoles, las acelgas, tortilla de papa en salsa de perejil, o cocido español. Varias veces por semana iba a dar clases a la Escuela de Arquitectura de la Universidad Autónoma de México y así lo hizo por cerca de 20 años, formando a muchos arquitectos, y que no fueron más por las dificultades que tenían en seguir sus razonamientos matemáticos. Me recuerdo muy joven recargada en su restirador viendo cómo dibujaba y calculaba sus obras, mientras él me explicaba lo que significaba un rotacional o las ecuaciones trigonométricas necesarias para comprender los esfuerzos, las tensiones y la forma en la que trabajaban los materiales.

Dos o tres veces por semana, después de comer, se iba al café Sorrento, a hablar y discutir, en el más puro estilo español, con los amigos, intelectuales del exilio español como León Felipe, Augusto Benedico, Armando Calvo y muchos otros que variaban de vez en vez.

Más tarde iba a trabajar y volvía a la casa para cenar y para continuar trabajando en su restirador, calculando sus obras con una regla de cálculo y una enorme sumadora, sacando miles de números sobre las variables de sus fórmulas, en infinitas sábanas de papel milimétrico. Pero no siempre trabajaba, le gustaba mucho leer, desde novelas policíacas, con las que amplió su vocabulario de inglés, hasta filosofía disfrutando a Ortega y Gasset, a Unamuno, a Bertrand Russell y muchos otros.

FUNDACIÓN JUANELO TORRIANO



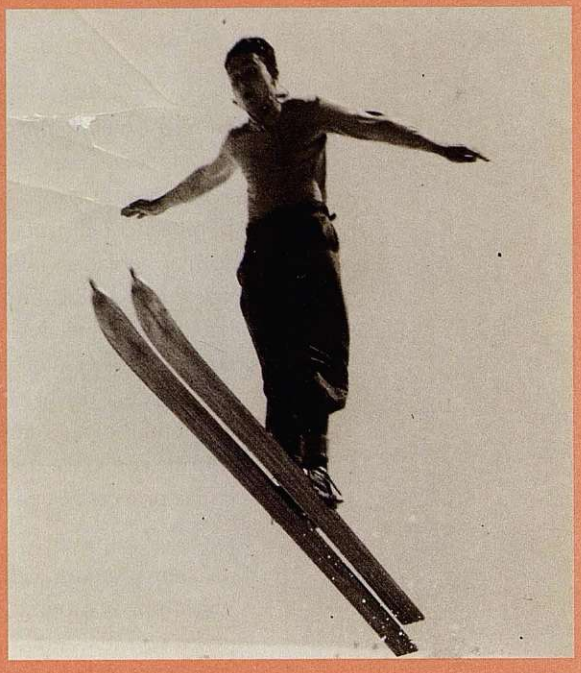
(F. 2)



(F. 3)



(F. 4)



(F. 5)

(F. 2)

Félix Candela trabajando, México, 1950

(F. 3)

En el Café Sorrento con amigos, México

(F. 4)

Con su equipo de rugby, España

(F. 5)

Saltando en esquís, España

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Leía mucho y de todo pero también tocaba con frecuencia su guitarra en las noches. Mientras, en el mismo cuarto, mi madre cosía alguno de los vestidos que nos hacía, para envidia de sus amigas refugiadas, y juntos escuchaban música clásica o flamenco después de que nos habían acostado. Los sábados y domingos iba a jugar frontón para mantener una actividad física y seguir haciendo deporte como lo hizo desde muy joven, obteniendo varios trofeos en salto de esquí y slalom, escalamiento de roca, garrocha, salto de altura, rugby y otros deportes, en competencias nacionales de España y algunas europeas. En casa había una parte de los libreros con copas de plata de trofeos.

Como padre más bien asumía las funciones que mi madre casi le obligaba a hacer, como cuando realmente habíamos hecho desastres entre las cuatro y le pedía que interviniera para aleccionarnos. Él llegaba muy poco convencido y nos planteaba que lo habían mandado a pegarnos y lo hacía con tal cuidado que casi siempre era motivo de burla nuestra, ya fuera exagerando el reclamo o casi riéndonos. No era un hombre dominante ni le gustaba mandar. No sólo no ordenaba, tampoco pedía ni a mi madre, a nosotras o a las sirvientas que le hiciéramos algo si él mismo lo podía hacer, como por ejemplo levantarse a buscar un salero que hacía falta en la mesa.

La relación entre nuestros padres fue de gran estabilidad dentro de una concepción tradicional en donde los papeles están claramente diferenciados pero en la que había mucha comunicación, un gran apoyo mutuo y admiración entre ellos. Mientras que ella era muy extrovertida, populachera, disfrutaba de los pequeños detalles de la vida cotidiana, alegre, divertida e incluso mal hablada, él era más tímido y serio, interesado en la filosofía y el arte, aunque con un agudo sentido del humor y muy irónico. Mi padre disfrutaba mucho cuando mi madre contaba chistes o anécdotas con mucha gracia entre los amigos o cuando cantaba flamenco o tangos mientras él la acompañaba con la guitarra. Mi madre admiraba enormemente el trabajo y la capacidad de mi padre y solía impulsarlo y darle confianza cuando él se sentía inseguro al emprender alguna tarea. Siempre sentimos que la fuerte personalidad de nuestra madre y la enorme confianza que ella tenía en mi padre fueron muy importantes, y él lo decía, sobre todo en las primeras etapas de su trabajo.

Frente a su trabajo arquitectónico, ya de mayores, nos comunicaba que lo más importante para él en la arquitectura es hacer de ella un medio para construir ambientes bellos, agradables y acogedores pero que también sean accesibles para la mayoría de la gente incluyendo los que tienen pocos recursos. Por eso una de las cosas que le preocupaba es que las construcciones fueran lo menos costosas posible. Fue parte de una generación de intelectuales humanistas y democráticos que tuvieron que abandonar España por sus ideas políticas, las mismas que llevaron a toda su obra. Muchas veces lo invitaron en los años de la España franquista a diferente actos y él siempre contestó que si no había tenido que sufrir las humillaciones que muchos de los que se quedaron tuvieron que soportar, lo menos que podía hacer era mantener la dignidad de no volver mientras que viviera Franco. Y así lo hizo. Fue muy apasionado, tenaz e incluso obsesivo frente a su trabajo, en el que se absorbía y se desconectaba del mundo hasta que entendía el problema que estaba tratando de resolver. Siempre decía que las soluciones más valiosas son aquéllas que cuando se plantean parecen obvias y sencillas, pero a las que sólo se llega a través de una comprensión profunda de los fenómenos y mucho trabajo matemático. Su formación en Madrid, en donde los arquitectos compartían los dos primeros años de cursos con los físicos y los matemáticos, le ayudaba en esta tarea. Por eso cuando yo le planteé que quería estudiar Arquitectura me dijo que en ese caso estudiara primero Física para tener la libertad necesaria para la creatividad arquitectónica.

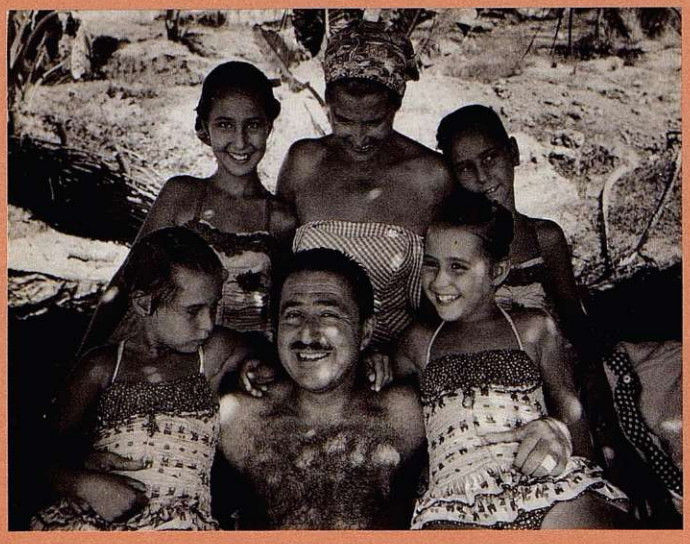
Planteaba que si se quería llegar a soluciones sencillas y bellas había que estudiar qué formas se dan en la naturaleza para sostener con el mínimo esfuerzo los objetos en contra de la gravedad. Para él la Arquitectura no puede ser ajena a una concepción política, humanista e incluso ambientalista. Por eso ya desde los años 60 tenía una fuerte preocupación por el futuro ecológico del planeta. Fue de los primeros que manifestó insistentemente su preocupación por el hundimiento de la ciudad, pero también por el descongelamiento de los polos y por otros efectos destructivos de la actividad humana sobre el medio ambiente. Ya a finales de los 50, en la planta de Bacardí, construyó un sistema de recuperación del agua de lluvia.

Siempre mencionaba que él había sido muy lento para todo en la vida. Desde la anécdota de que no habló nada hasta que tenía 3 años, cuando una noche les dijo a sus abuelos "buenas

FUNDACIÓN JANELO TURRIANO



(F. 6)



(F. 7)



(F. 8)

(F. 6)

Con mis padres y hermanas, México, 1952

(F. 7)

Con mis padres y hermanas en la playa, México, 1956

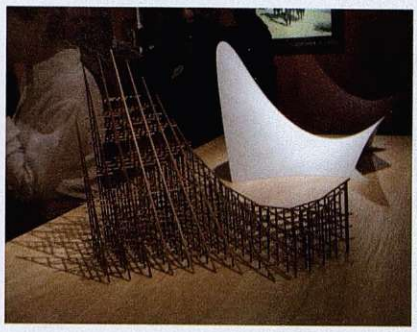
(F. 8)

Mis padres en casa, una copa de salto de esquís atrás, México, 1955

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO







(F. 9)

Maqueta del Restaurante Los Manantiales, México, en la Exposición de Princeton, USA, 2006

(F. 10)

Maqueta de la Fábrica Bacardí, México, en la misma exposición

(F. 11)

Maqueta de la Iglesia de Palmira, Mor, México, en la misma exposición

noches abuelitos, hasta mañana". Esto nos habla de un profundo sentido autocrítico y perfeccionista desde sus primeros años. Como el hijo mayor de una familia de clase media, con un padre comerciante pero con fuertes intereses y relaciones con intelectuales de principios del siglo xx, que murió cuando él y sus dos hermanos Julia y Antonio eran muy jóvenes, tuvo que costear sus estudios de Arquitectura vendiendo las notas de los cursos y dando clases a sus compañeros. Planteaba que hasta los 40 años maduró y fue capaz de crear su obra. Antes tuvo que aprender de manera autodidacta varios idiomas como inglés, francés y alemán y algo de ruso para poder leer todo lo que se había escrito sobre cascarones hasta los años 40. Fueron muchas horas en la soledad con sus diccionarios y la enorme necesidad intelectual de comprender los artículos que tenía frente a él.

Se tuvo que formar así, ya que el día que salía de Madrid hacia Alemania para hacer un posgrado en cascarones de concreto estalló la guerra y en el mismo aeropuerto tuvo que tomar la decisión, de la que siempre se sintió satisfecho, de irse a estudiar o quedarse a tratar de defender la República. Se quedó y siguió el mismo camino que miles de refugiados que llegaron a México como uno de los países que más generosamente los acogieron. Siempre mencionaba que fue ese México de los 40 y los 50, en el que había un ambiente de libertad, de creatividad y debates intelectuales y artísticos muy productivos sobre las características de la mexicanidad frente a las ideas más avanzadas del mundo occidental, en el que privaba la flexibilidad y apertura para las ideas innovadoras por no haber excesivas normas limitantes, el que le permitió crear su obra. En nuestra casa, y en la casa de nuestro vecino el pintor y arquitecto Roberto Fernández-Balbuena, comieron Cuevas, Arturo Calzada, Juan Rulfo, Matias Goeritz, Arreola, el Pelón de la Mora, Remedios Varo, Cuevas, Ramón Xirau, José Gauss y muchos otros arquitectos, intelectuales y artistas de México, de España y de otros países que se dieron cita en esta maravillosa ciudad que era la de México en esa época. Ni en Estados Unidos, ni en otros países de Europa y por supuesto mucho menos en la España franquista, hubiera podido crear su obra ni se le hubiera permitido tomar los riesgos que implicaba hacer construcciones tan novedosas y de las que muchos creían que se iban a caer al primer soplo de viento o al primer breve temblor. Por eso nunca terminó de agradecer suficiente a este México en el que se nacionalizó en cuanto se abrió la primera oportunidad de hacerlo.

No sólo reconoció el apoyo y aporte de sus hermanos y de muchos arquitectos, que también le dieron su firma para poder hacer las obras que no podía registrar porque su título de arquitecto se perdió en la guerra. Irónicamente, ya cuando no lo necesitaba, recibió cerca de 30 títulos de doctorado de diversas universidades del mundo. Pero además, ignorando jerarquías sociales, en muchas ocasiones reconoció las soluciones a los problemas de construcción que le daban algunos de los excelentes carpinteros y albañiles que tenemos en México y que, con el profundo conocimiento artesanal que forma parte de nuestra identidad, comprendían empíricamente muchos problemas que no eran fáciles de resolver desde la teoría.

A pesar de que nuestro padre fue un poco despegado, por estar absorbido en su tarea creativa, es un privilegio haberlo tenido cerca porque era un hombre bueno y por todo lo que nos transmitió de amor y entrega por el trabajo, de pasión por el conocimiento, de honestidad, de coherencia, de gusto y sensibilidad por el arte, de responsabilidad social y de valoración por la profunda cultura de nuestro México, y por sus gentes, además del enorme orgullo que sentimos por todo lo que aportó a la arquitectura.

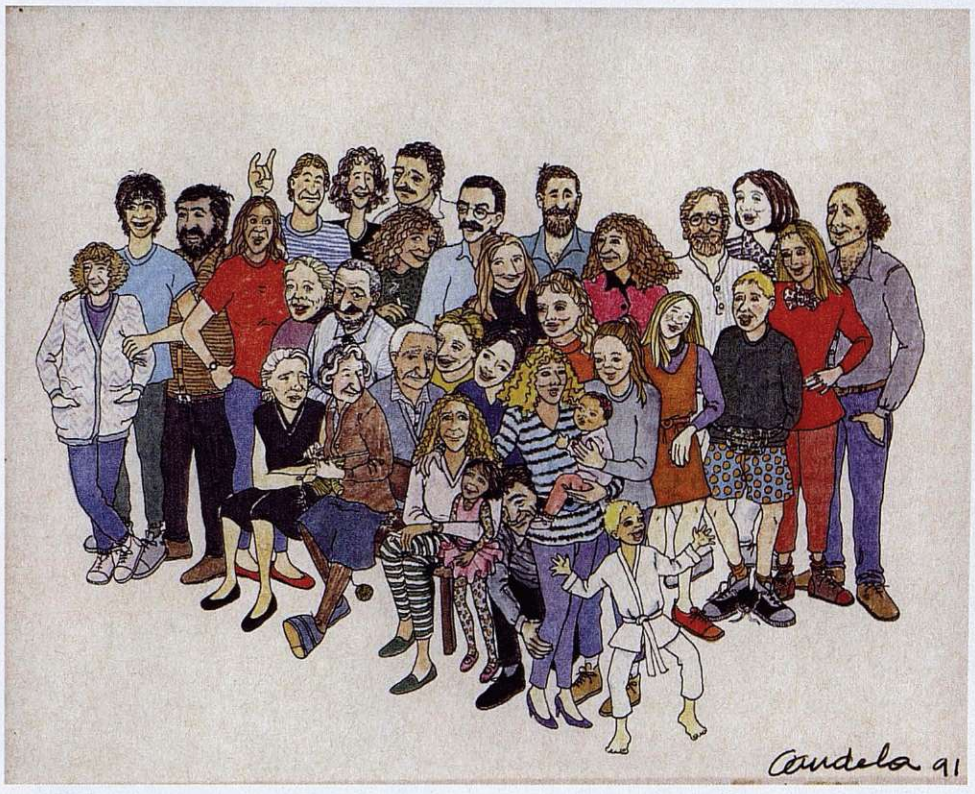
FUNDACIÓN JOSÉ MANUEL TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Félix Candela: memoria y recuerdos

Julia Gómez Candela
Arquitecto, México
Becaria de la Subdirección de Alumnos ETSAM
Universidad Politécnica de Madrid UPM

A la familia Candela



(F. 1)

Caricatura familiar realizada por Tere Candela, hija de Félix Candela. Félix se encuentra detrás de la tía Julia, quien está tejiendo.

Una biografía es, en pocas palabras, la historia de una vida. Las biografías describen a Félix Candela como una persona "sencilla" y "campechana"... Yo no lo conocí, pero todos mis primos dicen que cuando venía a México –algo poco frecuente–, les traía muchos regalos.

Apenas recuerdo a su hermano Antonio, no obstante, sé que fue una maravillosa persona, y mis recuerdos son todos de la tía Julia, con la que, se puede decir, conviví más. Toño, Félix y Julia no están aquí para hablar sobre sus vidas. Sin embargo, la Toña, la Pili, la Tere y la "Noli", junto con mi mamá, la tía Gela, la tía Ara, la tía Carmen, el tío Julio, y por supuesto el tío Toño, pueden descifrar cómo fue la vida de Félix papá y Félix tío. Otros, como mi tío Jumber o Juan Benito Artigas y Fernando Serrano, también me han ayudado mucho a entender cómo fue Félix Candela como persona.

Yo lo único que sé es que cuando le pregunté a mi mamá por qué era famoso, me dijo que porque él era capaz de construir círculos con puras "rayitas" (rectas).

Como en todas las historias, las familias tienen muchas versiones. Y en una familia donde se toca un negocio familiar, con muchas historias entrelazadas, es complicado llegar a un acuerdo; las interpretaciones familiares siempre son delicadas. No voy a ocuparme del arquitecto, uno de los más originales sin duda, porque hay personas en esta publicación que pueden hacerlo con mucha más autoridad. Lo único que voy a intentar es escribir la historia como me la contaron a mí.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



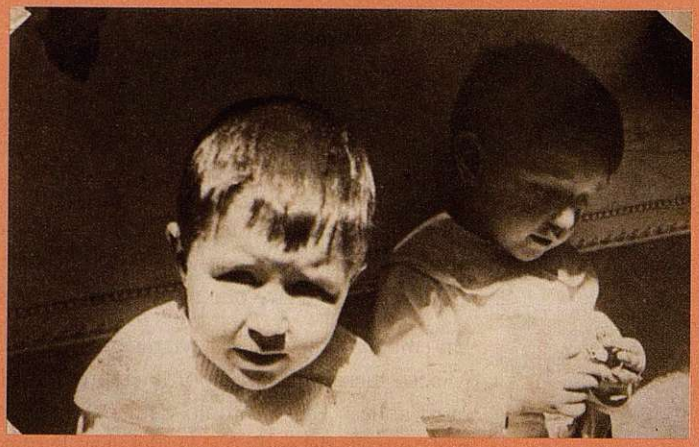
(F. 2)



(F. 3)



(F. 4)



(F. 5)

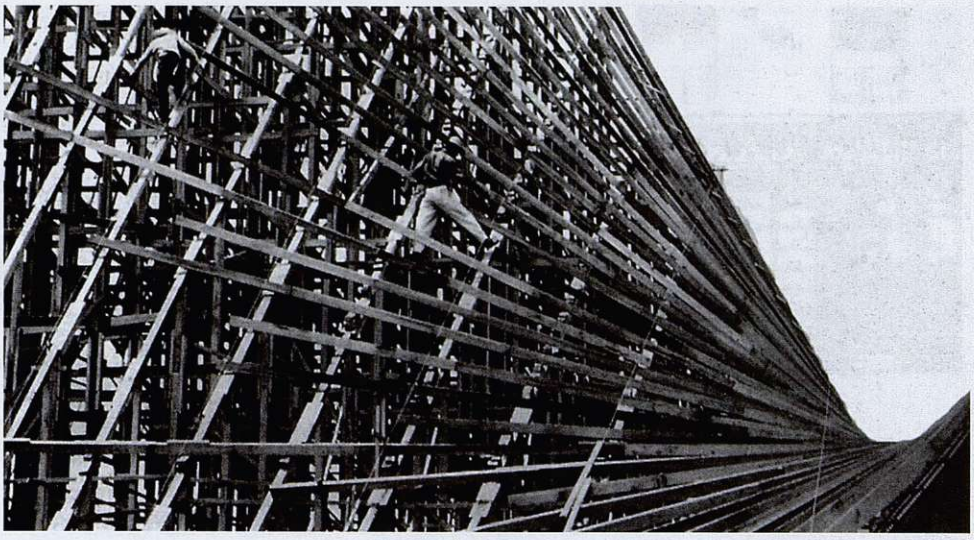


(F. 6)

(F. 2)
Calzados Candela
(F. 3)
Félix Candela
(F. 4)
Félix y Julia Candela
(F. 5)
Félix y Antonio Candela
(F. 6)
Félix, Julia y Antonio

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 7)
Cómo hacer círculos con "rayitas"



Como familiar puedo ofrecer a esta biografía las anécdotas de la zapatería, de las Películas Paricutín o de cómo le ofrecieron Zihuatanejo, una ciudad en el Pacífico mexicano, como pago de un trabajo.

Dividir las funciones de cada hermano en la empresa familiar Cubiertas Ala, la muerte de su primera esposa, Ladi, y la vida en México sin Félix son temas que no definen la creatividad del arquitecto Candela y que no se tocarán en este texto…

Sin embargo, me gustaría aclarar que la mayor parte de las obras proyectadas y construidas en México fueron firmadas por la empresa Cubiertas Ala, un negocio encabezado por los hermanos Candela: Félix, Antonio y Julia, y otra serie de arquitectos, ingenieros y dibujantes que formaban parte del equipo (Manuel Elías, Bernardo Ramírez…).Y que la etapa más creativa de Félix Candela fue durante el matrimonio con Ladi, mientras que su etapa de mayor impulso en las relaciones públicas la tuvo con Dorothy Davis.

En las biografías de Félix Candela aparecen nombres como los de Eduardo Torroja, Pier Luigi Nervi, Antonio Gaudí, Buckminster Fuller, Santiago Calatrava, Yutaka Saito… Y son pocas en las que se habla de su vida personal: de su primera esposa Ladi, de su hermano Antonio y de su relación con sus hijas. Hay algunos hechos importantes en la biografía de Félix que son irrevocables: el 27 de enero de 1910 nace Félix Candela Outeriño; un año después, el 14 de abril, su hermana Julia (quien padece polio a muy temprana edad), y el 13 de junio de 1912 su hermano pequeño Antonio.

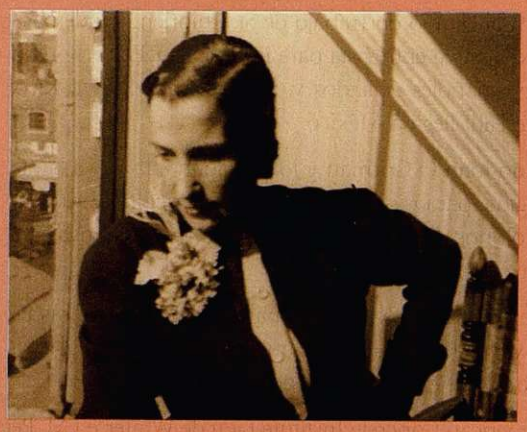
Los hermanos Candela estudian, primero en Centro de Hijos de Madrid en la Plaza de la Villa, y después el Bachillerato en el Instituto Cardenal Cisneros de la calle San Bernardo. En 1929 los hermanos Candela entran a la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, y ese mismo año muere su padre, Félix Candela Magro, de tuberculosis.

El mismo año en que se termina el Frontón Recoletos de Eduardo Torroja y el Mercado de Budapest de Dischinger y Finsterwalder, 1935, Félix Candela se titula con un proyecto titulado "Plaza de Toros con Cubiertas Colgantes y Reminiscencias Exteriores Tradicionales". Ese mismo año abre un pequeño estudio con E. Robles y Fernando Ramírez-Dampierre.

En 1936 conoce a Ladi, su futura esposa y gana una beca para ir a Alemania con Dischinger y Finserwalder para estudiar "Las Influencias de las Nuevas Técnicas de Hormigón Armado en la Plástica Arquitectónica".

El día de su embarque, el 18 de julio de 1936, se desata la Guerra Civil española. Félix y Antonio colaboran con el Ejercito Republicano en las obras de Defensa de Madrid, en la protección del Museo del Prado a cargo de R. Fernández Balbuena, y llevan la Comandancia de Obras de Albacete. Mientras tanto su madre y hermana se trasladan con la abuela paterna Magro a Crevillente, Valencia. En 1938 los hermanos Candela son destinados a Lérida para la ofensiva del Ebro.

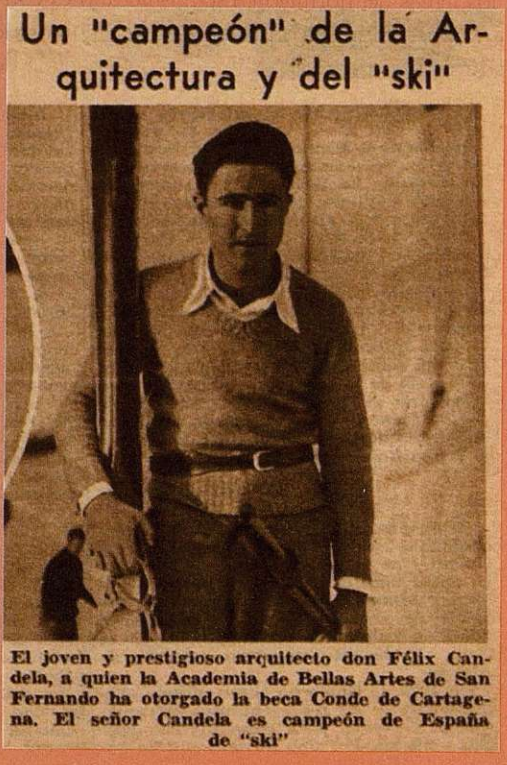
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



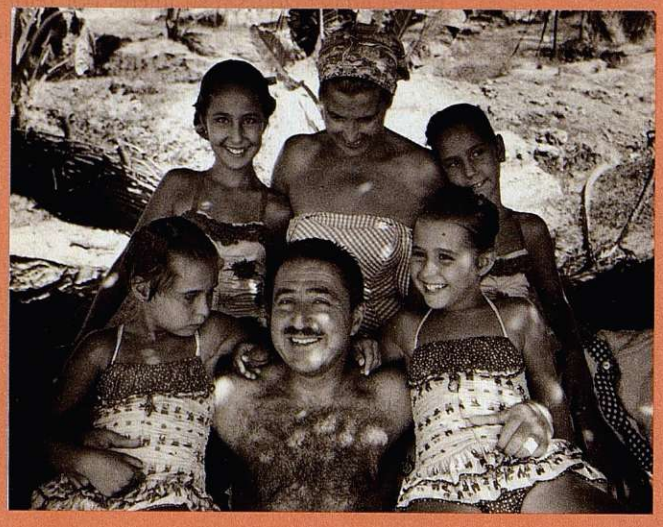
(F. 8)



(F. 9)



(F. 10)



(F. 11)

(F. 8)

La tía Ladi

(F. 9)

Félix Candela y amigos en la Sierra de Navacerrada

(F. 10)

Recorte de periódico

(F. 11)

Félix, Ladi y las cuatro hijas

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Escapando de la guerra, llega a Francia en 1939, al campo de Trabajo de St. Chiprien, donde pasa tres meses. Candela es seleccionado tras una exhaustiva entrevista para ir a México. En Le Boulou embarca en el Sinaia junto con un grupo de españoles exiliados y, pasando por Puerto Rico, llega el 13 de junio a México. El año siguiente Ladi llega a México.

Al llegar a México, visita al arquitecto mexicano Juan O´Gorman y lo trasladan a la Finca Santa Clara en Chihuahua, al norte del país de acogida, para diseñar una colonia agrícola. Ahí resolvió el alojamiento temporal de más de 500 colonos. Comienza a trabajar como dibujante para el proyecto del pueblo "Ojos Azules" y de un Ayuntamiento.

Raúl Fernández Balbuena, antiguo delineante de Zuazo, lo contrata para dirigir unas obras en Acapulco; y con el dinero de este contrato, y gracias a que gana un concurso de bungalows para el Hotel Papagayo, puede llevar a su madre y hermana a México.

En 1945, Félix Candela lee un artículo en la American Concrete Institute (ACI) de Winter e I.M. Pei que habla sobre losas plegables, y conoce a Maillart a través de un libro de Max Bill; se atribuyen estas razones a su interés por retomar los temas del hormigón. Ese mismo año es contratado por Vías y Obras, una empresa de Jesus Martí, con quien construye y proyecta una serie de obras. Se le atribuye muchas veces, la construcción y diseño del Ministerio de Hacienda de Tepoztlan, una pequeña población al sur de la capital mexicana.

Pero es sin duda el nacimiento de su primera hija, Toña, el acontecimiento más importante de 1945 en la vida de Félix Candela.

Su hermano Antonio y su mujer Antonia se conocen en Madrid por medio de Ladi, la esposa de Félix, y deciden viajar de visita a México después de la guerra para conocer a su sobrina, La Toña. Viajan con el dinero de la ebanistería que tenían en la calle Núñez de Balboa. En este viaje Antonio y Antonia deciden quedarse a vivir en México, y sin regresar a España desmontan su piso y venden la ebanistería. Una vez en México, los hermanos Candela empiezan la construcción de su primer proyecto juntos: un edificio de apartamentos en Peralvillo. Al año siguiente, junto con E. Robles, los hermanos Candela abren un estudio en la calle Insurgentes nº126 de la ciudad de México. El primer encargo que tuvieron fue el diseño de 24 tribunas desmontables para el Ayuntamiento.

En este año M.G. Lavin les encarga un hotel de 7 pisos en la calle Donceles (junto a la Catedral Metropolitana y sobre el Teocali prehispánico). Éste será el Hotel Catedral, considerado por muchas fuentes la primer obra firmada por Félix Candela en México. Les ofrecen Zihuatanejo (entero) como forma de pago. Los hermanos prefieren, en cambio, la forma tradicional de pago.

En 1947 nace la segunda hija de Félix y Ladi: Manolita. Para nosotros, Noli.

Antonio gana el Premio Gordo de la Lotería en 1948, y con Antonio y este dinero, además de montar Cubiertas Ala, monta la Productora Paricutín.

Este año nacen las gemelas de Félix: la Tere y la Pili.

En 1949 los hermanos Candela construyen el primer cascarón experimental: una bóveda antifunicular con encofrado de tela de saco tipo ctesiphon en San Bartolo Naucalpan en el estado de México. Félix Candela traduce al castellano el libro de Salinger sobre el método de cálculo a ruptura.

Cubiertas Ala nace en 1950 en la calle Insurgentes nº 123 de la ciudad de México. Será gracias a esta asociación de Félix Candela con Antonio Candela, Fernando y Raúl Fernández, Luis Certucha y Julia Candela como se dará a conocer internacionalmente el nombre de Candela.

Este año Félix publica su primer artículo con el título de "Cubierta Prismática de Hormigón Armado en la ciudad de México", y apunta la importancia de la escala en el comportamiento de las estructuras y como ésta debía reflejarse en la complejidad de los cálculos necesarios para su construcción.

Al siguiente año, en 1951, Candela publica su primer artículo en el *Journal of the American Concrete Institute* ACI: "Simple Concrete Shell Structures". Y también presenta *Hacia una nueva filosofía de las estructuras*, publicación que rompe con los métodos clásicos de análisis elástico de estructuras. En este año Cubiertas Ala construye más de 20 cascarones, entre ellos, el Pabellón de Rayos Cósmicos de la UNAM, edificio elogiado por Erich Mendelsohn y que constituye el primer gran éxito internacional de Cubiertas Ala y de Félix Candela.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



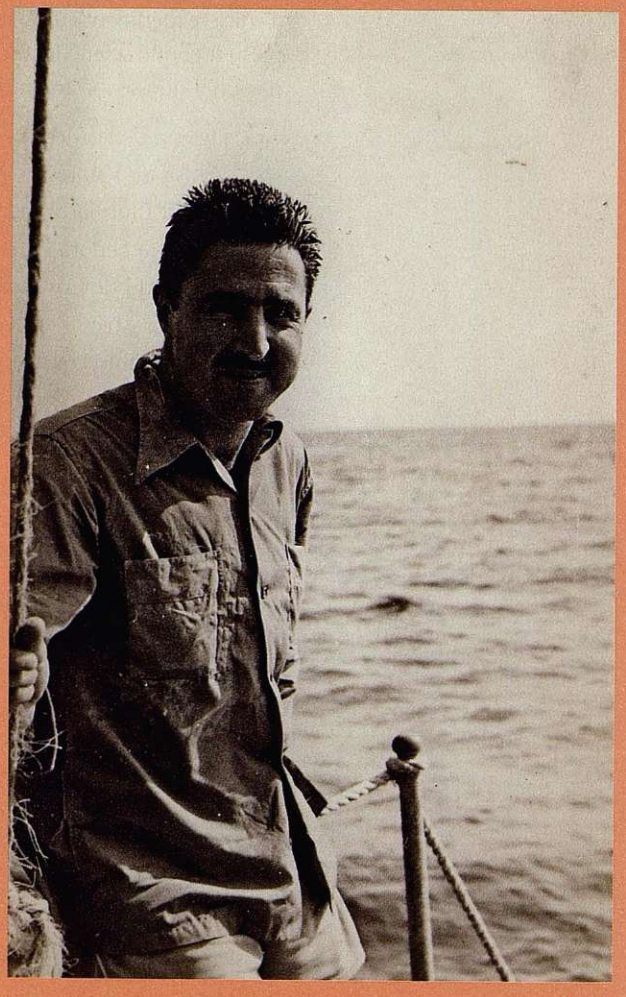
(F. 12)



(F. 13)



(F. 14)



(F. 15)

(F. 12)

La Virgen Desnuda (1950) con Susana Guizar y Gustavo Rojo Pinto fue una producción de Paricutín Films

(F. 13)

Paraguas experimental, diseño arquitectónico de Carlos Recamier. Es la primera vez que se usan paraguas invertidos en la cimentación, aumentando la superficie

(F. 14)

Felicitaciones navideñas de Cubiertas Ala

(F. 15)

Félix Candela

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Fue en 1952 cuando empieza la construcción en serie de Cubiertas Ala, usando cimbras y encofrados móviles. Esto no era ninguna novedad, pero como el material empleado en los cascarones es el mínimo, el secreto de su economía es abaratar el proceso del encofrado. La economía es mayor, si se emplean piezas rectas, es decir, únicamente generatrices rectas.

Como todo proceso creativo, es a partir de este momento cuando empiezan las variables y la experimentación dentro de las miles de posibilidades que permite el *hypar*. En 1953 comienza a inclinar el *hypar* para permitir la entrada de luz, como en las construcciones industriales con dientes de sierra. También pide a Salinger el permiso para publicar la traducción que hizo de su libro *Die Neue Theorie des Stahlbetons awf Grund der Bildsamkeit vor den Bruch* sobre teorías de ruptura. De este año es el proyecto de la Medalla Milagrosa y la Bolsa de Valores, la primer bóveda por arista con *hypars* que desarrolla, y que lo lleva a desarrollar, el borde libre.

Una serie de revistas y artículos empiezan a citar y nombrar a Félix Candela de Cubiertas Ala y es invitado por el MIT en 1954 para presentar "The Shell as Space Encloser" y "Warped Surfaces", poniendo como ejemplo el recien construido Night Club Jacaranda.

Es entonces cuando comienza el boom del trabajo de Candela. Comienza a llevar al límite la técnica, experimentando con las posibilidades del material y las condiciones constructivas del país en el que se encuentra. Impulsado por su mujer, la tía Ladi, y con el reconocimiento internacional que se iba forjando, desarrolla la mayor parte de sus proyectos conocidos:

- Iglesia de la Medalla Milagrosa
- Bolsa de Valores de México
- Night Club Jacaranda
- Nuestra Señora de la Soledad (El Altillo)
- Mercado de Coyoacán
- Capilla Abierta en Palmira (Cuernavaca)
- Restaurante Los Manantiales
- Planta Embotelladora Bacardí
- Casino de La Selva (Cuernavaca)

Colin Faber, a principios de 1958, entra en contacto con Félix Candela para empezar a trabajar en su proyecto de libro: *Candela: The Shell Builder*; quizá una de las publicaciones más conocidas y consultadas sobre Félix Candela.

Félix Candela inaugura la International Association of Shell Structures (IASS) con un artículo que le encarga Eduardo Torroja en 1959. Al año siguiente, mientras daba una conferencia en New Haven, invitado por Paul Rudolph, conoce a Joseph Albers, Miguel Oriol y Eero Saarinen. Publica en el ACI el artículo de "General Formulas for Membrane Stresses in Hyperbolic Paraboloidical Shells" donde da a conocer expresiones matemáticas inéditas que hacen posible la solución numérica del programa para cualquier tipo de carga. Y durante la exposición de su obra en el Architectural League de Nueva York, muere en México su madre, Julia Outeriño Echeverría.

Poco a poco, Félix Candela se va adentrando al mundo americano. Se da a conocer al principio por sus artículos y obras y, más tarde, por sus exposiciones y conferencias. Hasta que en 1961 se le asignan seis semanas de profesorado en Harvard, dando clases junto con Pier Luigi Nervi y Richard Buckminster Fuller en la Charles Eliot Norton Professor of Poetry. Es en ese año, 1961, cuando le otorgan la primera Medalla Auguste Perret del Congreso de la UIA, el mayor reconocimiento que podía recibir un arquitecto en esa época.

El 3 de septiembre de 1963 muere de cáncer su esposa Ladi. El mismo año en el que se publica el libro de Colin Faber *Candela: The Shell Builder*, la revista *Time* da a conocer la Capilla de Palmira y le conceden el Honoris Causa de Bellas Artes en la Universidad de Nuevo México.

Al año siguiente, en 1964, se asocia con Mr. Cutting y la firma Praeger-Kavanagh-Waterbury de Nueva York como consultor estructural para los proyectos de grandes espacios deportivos; desarrolla muchas conferencias y ponencias en Estados Unidos, quizá la más conocida la de Dallas, "Structural Form at the Service of Eloquent Architecture", donde conoce a Alvar Aalto y Arne Jacobsen; este último construyó un cascarón que dibujó Félix en una servilleta: la bóveda por arista triangular del Jardín Botánico de Oslo.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

En este momento aparece la arquitecta Dorothy Davis, con quien se casa en 1967, en el City Hall de Nueva York y ofreciendo un banquete en el Pan-Am Building. También éste es el año de la publicación del polémico artículo "El escándalo de la Ópera de Sidney", y el año cuando Félix Candela preside el Congreso de la IASS (International Association of Shell Structures) celebrado en México.

En el año del movimiento estudiantil de 1968, entra como consultor en el ICA (Ingenieros, Consultores y Arquitectos); pero le exigen que se pronuncie en contra de la revuelta estudiantil, cosa que él no hace: manda a sus hijas al extranjero temporalmente, para protegerlas de estos acontecimientos. El hecho de no pronunciarse públicamente es una de las razones por las que se le complica encontrar trabajo en el país. No obstante, es en este año cuando le llueven propuestas para mudarse al extranjero: es invitado a Madrid por Florencio del Pozo para el Congreso de la IASS, en memoria de Eduardo Torroja, y por Juan Antonio Samaranch para un seminario de Instalaciones Deportivas.

También en 1968 visita las oficinas del US Army con Emilio Pérez Piñero, a quien conoció durante el congreso de la UIA en 1961 (cuando los dos son premiados: Candela con la Auguste Perret y Pérez Piñero por su trabajo como estudiante): ambos tenían prevista la construcción de un invernadero en la Luna y muchos proyectos de estructuras plegables. Es conocido también el proyecto de Félix Candela para el Concurso del Planning Board de Kuwait, donde también se presentan proyectos de Nervi y Kenzo Tange.

En 1969 regresa a España por primera vez tras su exilio y formaliza su asociación con Emilio Pérez Piñero. Con él, las superficies alabeadas se convierten en el elemento secundario en estructuras para cubrir grandes luces. La primera referencia de esto se da en 1964 en un proyecto de Candela para el Crystal Palace de Londres, en el que aparecen unas estructuras arbóreas de hormigón, rematadas por paraboloides hiperbólicos de planta paralelepípeda. En la solución del Palacio de los Deportes de México, en 1966, intervino un consejo de Pérez Piñero. *Las Estructuras de Candela*, la traducción al español del libro de Colin Faber, se hace en 1969, mismo año en el que se desvincula de Cubiertas Ala y monta su propio estudio en su casa de Tlacopac. Diferencias y conflictos familiares lo hacen alquilar en 1970 la casa-estudio de Tlacopac y mudarse con Dorothy a otra casa en la colonia Polanco de la ciudad de México; pero al poco tiempo deciden mudarse a la casa de Dorothy en Beekham Place en Nueva York. Y ese mismo año abre un estudio en Madrid junto a Emilio Pérez Piñero en Avda. de La Habana 5, 5°D. Félix se instala en un piso en la Plaza del Cordón cuando viaja a Madrid.

Finalmente, se trasladan definitivamente a Nueva York en 1971, cuando Félix es nombrado Full Professor en la Universidad de Illinois en Chicago. Dorothy y Félix se van a vivir a un ático en "The Osborne" entre la 57st y la 7Av de Nueva York. Por su parte, Dorothy obtiene una serie de encargos del ex-presidente Miguel Alemán para la dirección de la remodelación de un piso en Beekham Place.

En 1972, Félix Candela es invitado como profesor en Filadelfia, donde daban clases en el mismo momento Louis Kahn y Robert LeRicolais. Y en el centenario del nacimiento de Maillart, Candela lee "La herencia de Maillart" en la Universidad de Princeton.

A través de I.M. Pei, proyecta un Centro Comercial en el solar del actual estadio Santiago Bernabeu y hace a la vez un proyecto para el estadio, trasladándolo fuera de la ciudad de Madrid. Ese mismo año, en 1973 es readmitido en el Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid (cuando Javier Carvajal era decano), con el número de colegiado 473.

1974 es el año en que oficialmente se termina el negocio familiar Cubiertas Ala y cuando Rafael de la Hoz (presidente de la Unión Internacional de Arquitectos UIA) invita a Félix para el Congreso en Madrid. En el Congreso Mundial de Arquitectura en Persépolis (cerca de Shiraz, Irán), se reúnen Candela, Sert, Candilis, Fuller, Soleri, Zevi, Tange, Backema, Van Eyck, Stirling, entre otros, y juntos visitan Estambul.

Dorothy y Félix compran seis casas en 1500 Jackson Blvd. de Chicago y son restauradas por ellos (principalmente por Dorothy). Una vez terminada la restauración, se mudan a una de ellas.

En 1976 viaja a Stuttgart a ver una reproducción de Schlaich de su obra preferida, Los Manantiales de Xochimilco. Y al año siguiente, en 1977, viaja a México para conocer a sus nietos, y proclama la Carta de Machu Picchu, que rectifica la Carta de Atenas de Le Corbusier y

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

los CIAM (Congresos Internacionales de Arquitectura Moderna), y que es firmada entre otros por Gordon Bunshaft y Bruno Zevi. Este año sufre su primer infarto, por lo que es intervenido para realizarle un triple bypass.

Dorothy consigue en 1978 que declaren Barrio Monumental el 1500 de Jackson Blvd. Ese mismo año viven entre los Estados Unidos, Atenas y París. Colabora en 1979 con Fernando Higueras, un colega suyo muy querido, para Idea Center y el Concurso del Centro Islámico de Madrid.

Desde entonces Dorothy y Félix viven entre Manhattan y Madrid. Félix colabora con el Metro de Madrid para un proyecto en la estación de Sol. Y se convierte en consultor para Santiago Calatrava. Mueren los padres de Dorothy y se trasladan a Raleigh.

El último año de su vida, 1997, trabajó con Santiago Calatrava en el diseño del Parque Oceanográfico y otras construcciones en la Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia.

Félix Candela muere al lado de sus hijas, a consecuencia de varios problemas que surgieron por una caída y la rotura de la cadera, el 7 de diciembre en Raleigh, Carolina del Norte.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Félix Candela: del hombre y su obra

Juan B. Artigas
Dr. Arquitecto
Profesor Emérito de la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM

A Julia Gómez Candela

De la belleza

En el análisis arquitectónico de la obra de Félix Candela, voy a destacar dos aspectos fundamentales que no suelen ser tratados por la crítica con la atención que merecen. El primero es el valor estético de sus creaciones, la belleza que las caracteriza. Ciertamente, no tengo el más mínimo reparo en utilizar el término belleza, cualidad de la forma que se transmite por ella misma, entendiendo por forma no únicamente su pura exterioridad, sino apreciándola como significante, como el medio para plasmar todo un contexto pleno, de la totalidad del complejo ser de las propias estructuras arquitectónicas, sin olvidar el sentir de quien las concibe y realiza. Porque, aunque parezca paradójico, las formas de las estructuras de Candela no terminan en sí mismas, surgen del terreno y se lanzan virtualmente mucho más allá de su límite construido; además, la forma ha de ser capaz de motivar la "proyección sentimental", endopatía o Einfühlung, del observador, esto es, procurar la proyección del sujeto en la obra que contempla. Se logra así la estructura conceptual que une al inventor, al objeto inventado y a quien lo percibe.

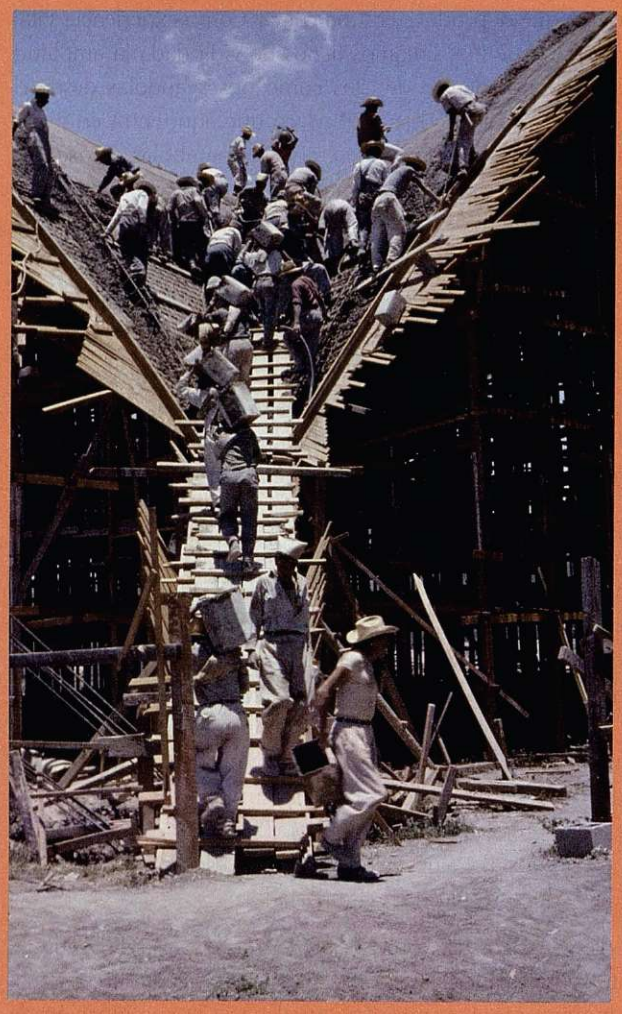
Destaco este primer aspecto de belleza como el más importante del quehacer de Félix Candela; quiero decir que entiendo sus estructuras como las obras de arte que son, por encima de las consideraciones técnicas de construcción o cálculo matemático que puedan realizarse acerca de ellas, que también son ciertas y dignas de atención. Digo estructuras en vez de decir edificios porque el que se conviertan y contengan edificios habitables viene a ser a veces algo circunstancial, tratándose de nuestro autor. A ver si me explico: hubo ocasión en que laborando en su despacho de la Avenida Insurgentes salió Candela al pasillo con un dibujo, más bien un croquis que me enseñó, de un conjunto de estructuras que conformaban un elemento total ascensional, piramidal podríamos decir, una especie de catedral con mayor elevación en el centro, altura desde la cual se desparramaba hacia abajo para sostenerse en el plano horizontal inferior del terreno; estaba el arquitecto alegre, resplandeciente; le pregunté que cuándo se construiría aquello y respondió sin pensarlo, detrás de su penetrante mirada de inteligencia: "en la primera ocasión que se me presente". No la había elaborado por encargo, lo había hecho por necesidad psíquica, como un juego. Por supuesto que aquella forma, de sobreposiciones continuas, plasmaba su intuición y su experiencia estructural en un modelo a todas luces sustentable.

Pero no olvidemos que indefectiblemente tiene que atender el arquitecto, también nuestro autor, a las condiciones propias de todo proyecto, como son las orientaciones o la dimensión del terreno o la ubicación de la propia estructura en un contexto determinado, así que la pretendida libertad total de la creación arquitectónica podría convertirse en una entelequia. Un ejemplo muy claro de esta situación entre los trabajos de Candela es la cubierta de la Sala de Remates de la Bolsa de Valores, ubicada como ya sabemos en un piso alto de un inmueble del centro de la Ciudad de México.

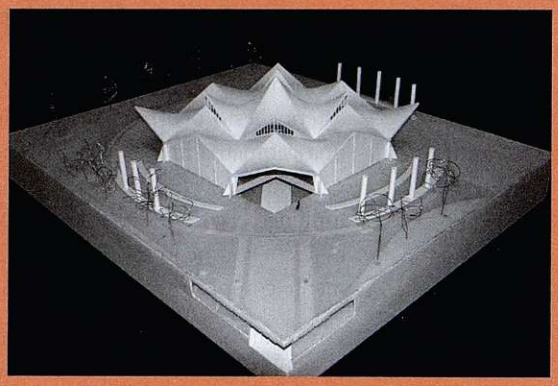
Ahora bien, ¿en qué reside la expresividad de su obra? El hombre se siente libre situado dentro o fuera de sus paraboloides hiperbólicos y hasta de sus esculturas, porque también hizo algunas. Quiere decir lo anterior que son formas que no encierran al espectador, ni mucho menos lo ahogan, no lo sitúan en un ambiente limitado, finito, no se da en sus construcciones

Salvo las indicadas, todas las fotografías pertenecen al Archivo de Juan B. Artigas

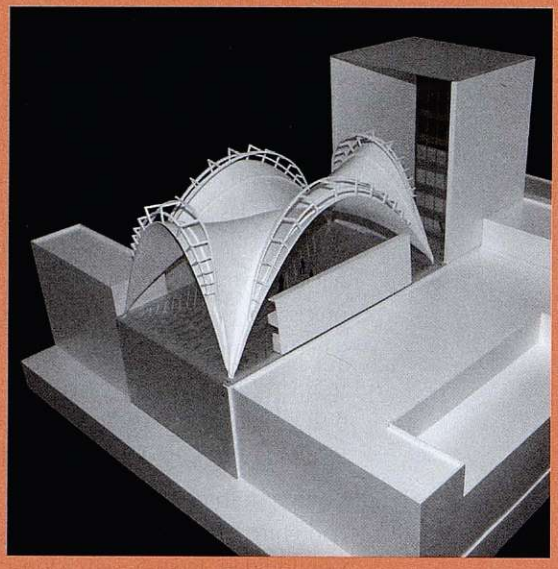
FUNDACIÓN JUAN ELO TURRIANO



(F. 1)



(F. 2)



(F. 3)



(F. 4)

(F. 1)

Colado para la nave de embotellado de la fábrica de Ron Bacardí. Se ve parte de la cimbra de madera y la fuerte inclinación de la cubierta, c. 1960

(F. 2)

Estación del metro San Lázaro en la Ciudad de México
Maqueta de Gerardo Oliva, UNAM, 2009

(F. 3)

Estructura de la Bolsa de Valores de México
Maqueta de Gerardo Oliva, UNAM, 2009

(F. 4)

Serie de paraguas en que se aprecia el ritmo repetitivo de las formas, 1959

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

la misma impresión vivencial de encierro que se produce en una cueva. Como experiencia vital opuesta a la descrita, sus formas provocan que nos sintamos llenos de vida dada la amplitud ambiental que condicionan, tanto situándonos dentro de ellas como observándolas desde el exterior; esto ocurre por la continuidad espacial que logran. Y claro que aquí entra en juego una geometría límpida, perfectamente asentada en el suelo, generalmente parábolas que se elevan muchas veces lanzándose hacia el infinito, aunque técnicamente se complementen estructuralmente con apoyos inclinados, tensores ocultos y otros sistemas complejos de equilibrio estático. Porque lo importante es la belleza por más que sea necesario elaborar procesos sumamente complejos para lograrla.

Por continuidad espacial queremos decir precisamente que el aire penetra desde el exterior del edificio hacia dentro y puede volver a salir, a veces por donde entró o bien por el lado opuesto, sin que haya elementos que detengan ese seguirse en profundidades dirigidas por las mismas formas de la materia construida. Por ello cuando un espacio cubierto por un paraboloide se limita con paredes verticales, puede romperse la impresión de continuidad que pregonamos.

Conforman los paraboloides hiperbólicos oquedades de amplitud considerable, seguidas de convexidades y contracurvas en continuidad, como en el cuerpo humano. Suelen lograrse con generosidad de trazo porque se continúa virtualmente la superficie reglada más allá del acabado de los materiales de construcción, haciendo que la vista no quede limitada a los contornos físicos de las formas concretas edificadas. Por consiguiente no pesan, se proyectan en continuidad más allá de su propia corporeidad, creando la impresión de que el espacio interno se lanza hacia el exterior continuándose por el aire de la naturaleza. Hay un momento en que no puede precisarse el límite entre el espacio natural y el edificado que, aunque limitado, no llega a contenerse nunca, a quedarse estático dentro de las superficies de doble curvatura de los cascarones. El primero de los dos espacios, el natural, existe en el mundo, el segundo es creación del arquitecto, y también la relación entre ambos. Así pues, son estructuras ligeras por su propio peso, y lo son también por la impresión que producen en el espectador.

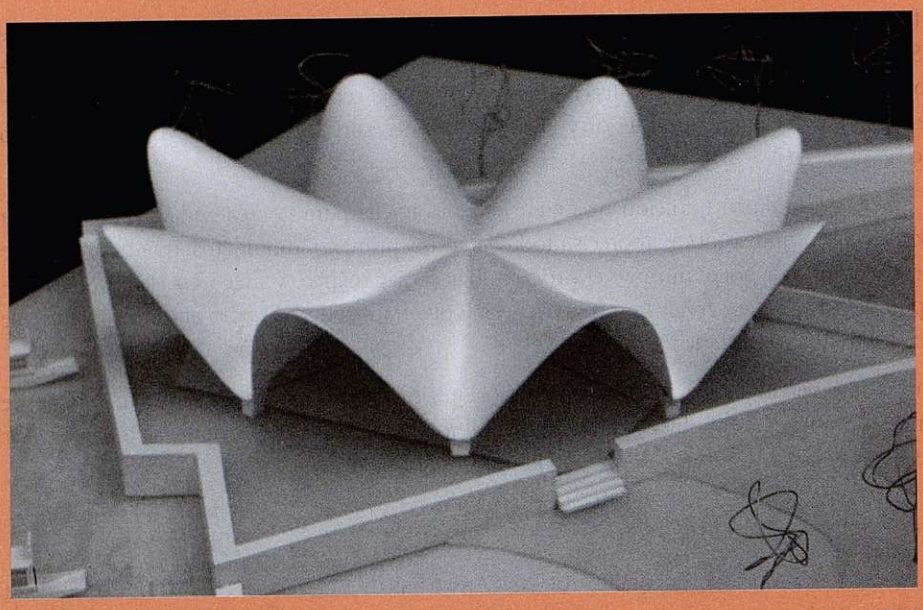
Contrapunto de formas cóncavas y convexas en sucesión constante, sin que exista discontinuidad entre ellas. Son simultáneamente dentro y fuera, interior y exterior en secuencia continua. Continuidad, tersura, sensación de movimiento, lanzamiento virtual hacia la continuación de las formas más allá de su término físico. Todo ello dentro de un estricto ordenamiento geométrico sin el cual no hubiera podido concebirse, porque a él se deben, porque la expresión plástica trasciende, va más allá del concepto matemático, utilitario y edificatorio en los que tuvo su origen, o mejor dicho, uno de sus orígenes. Ocurre algo semejante a la relación existente entre la semilla y su reproducción, que no pueden confundirse, ni como simiente ni como proceso, con la delicadeza, la plenitud y la belleza de la flor resultante. Las sensaciones producidas por la vivencia espacial y la emoción consiguiente entran dentro del campo de la expresividad artística de las formas, ya sean éstas espaciales y concretas como en la arquitectura, aun cuando se diluyan en el aire como en los ejemplos que nos ocupan, o bien en vibraciones como puedan darse en la música o en la poesía en voz alta. Esta cualidad específicamente artística, resultado de la creatividad humana, produce vivencias que no existirían sin el concurso de lo que llamamos arte, si el arte no existiera.

Para apreciar la continuidad espacial que comentamos son muy claros los planos del restaurante de Los Manantiales en Xochimilco. Demuestra el interés de Candela por la estética uno de los elementos que nos explicaba como gran logro: el que llamó "borde libre" en el mencionado restaurante. Consistió dicho hallazgo en eliminar las trabes de borde al término de los cascarones, para conseguir una línea sigmoidea delgada continua, borde de un solo trazo; la trabe indispensable para la sujeción del edificio queda acostada, alojada en la superficie del cascarón, sobre la línea directa de resistencia, transmisora de cargas hacia el terreno.

Hay veces en que el paraboloide hiperbólico no se constriñe dentro de paredes, en que ni siquiera una pantalla de cristal separa el interior y el aire externo. Es aquí cuando la estructura se convierte en ala de pájaro, vela de barco hinchada por el viento que flota en medio del aire, que no pesa y que no requiere sustentación. Tales la iglesia de Palmira o el cabaret Las Brisas en Acapulco, abiertos hacia los cuatro vientos y hacia el paisaje.

Tal vez sea en la iglesia de La Medalla Milagrosa donde se llega más al detalle en superficies de menor extensión, precisamente por la proximidad de los pilares, si bien se abren después las

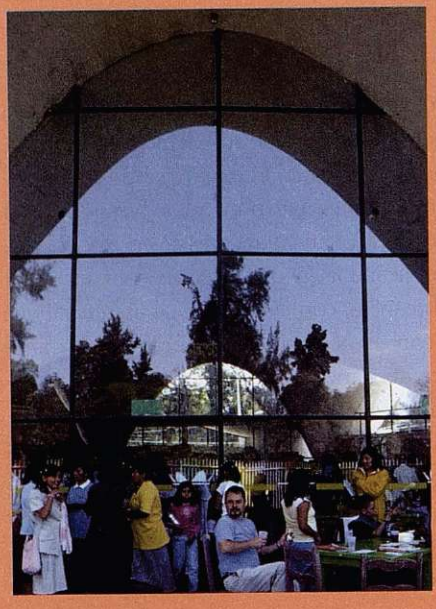
FUNDACIÓN JUAN O'GORMAN



(F. 5)

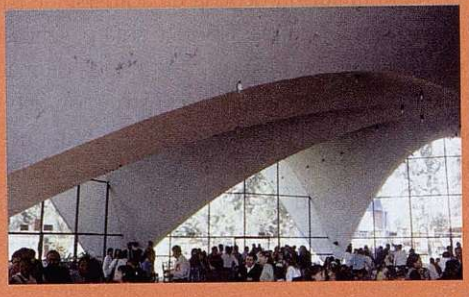
(F. 5)

Restaurante Los Manantiales en Xochimilco
Maqueta de Gerardo Oliva, UNAM, 2009



(F. 6)





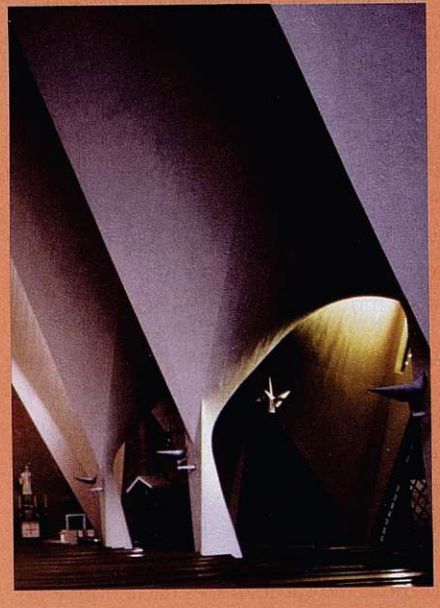
(F. 7)

(F. 6)

Los Manantiales, cualidades de transparencia y reflejos en los cristales de la fachada, 2005

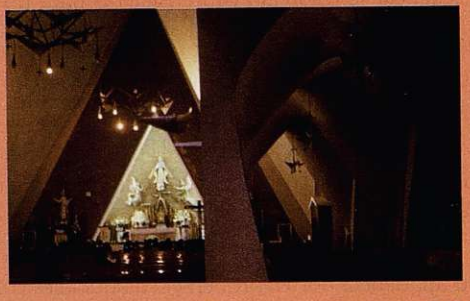
(F. 7)

Los Manantiales, vistas del interior, 2005



(F. 8)





(F. 9)

(F. 8)

Iglesia de La Medalla Milagrosa, 1997

(F. 9)

Iglesia de La Medalla Milagrosa, vistas del interior, 1997

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

superficies en curvaturas más amplias y por lo tanto más suaves conforme avanzan en elevación. Se despliega así el abanico de la continuidad que siempre va más allá. El espacio arquitectónico así creado, aunque limitado físicamente, no se antoja cerrado. Y sin embargo en este templo se percibe el recogimiento interior y la penumbra necesarios para la concentración en uno mismo.

"Se proyecta a base de intuiciones. Una estructura se diseña y dimensiona intuitivamente y se calcula después. Con estas intuiciones –que son simplemente conocimientos firmemente establecidos en nuestro subconsciente– se mezclan tradiciones bien arraigadas o ancestrales recuerdos, también allí almacenados. Lo cual establece el sutil carácter autónomo de ciertas manifestaciones artísticas..."

En lo que Candela llama intuición reside el elemento inicial para la creatividad, inexplicable y huidizo, es como una sombra, imprecisa todavía en los primeros momentos, que habrá de irse concretando, poco a poco, durante el proceso lógico matemático, y luego en el de su edificación, para llegar así a concretar la forma, es decir, volverla realidad. Es sólo entonces cuando se justifica toda la labor anterior.

A mi modo de ver, la exposición que hasta ahora mejor valora la obra de Félix Candela desde su dimensión estética es también gráfica, debida al fotógrafo Yutaka Saito; el texto del libro, por estar en japonés, para mí sigue perteneciendo al misterioso oriente.

La sinceridad arquitectónica

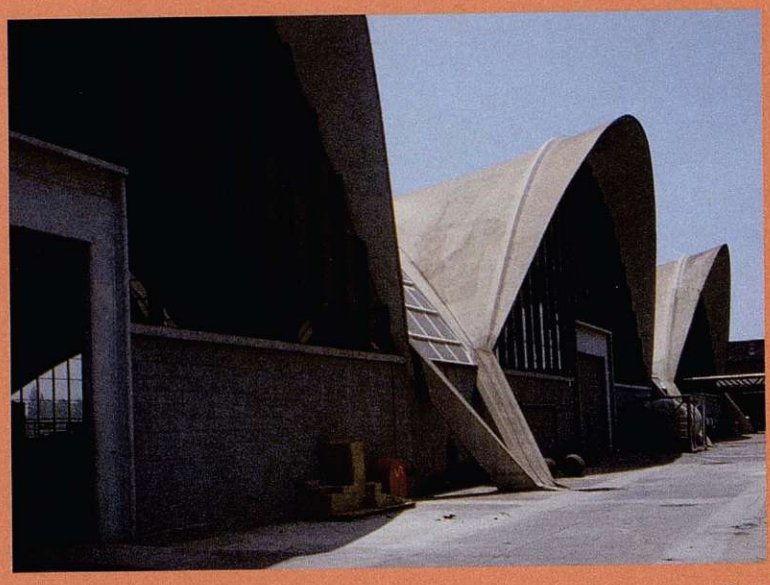
El segundo tema anunciado del análisis de las estructuras de Candela se refiere a la teoría de la arquitectura, en boga por los años de 1950-1970, que pregonaba la llamada "sinceridad arquitectónica". Esta expresión se refiere a que el exterior de la arquitectura ha de reflejar lo interno de la misma, teoría derivada, de alguna manera, del concepto clásico que persigue la adecuación entre fondo y forma o entre forma y contenido.

Se vertía así un concepto ético en la práctica del proyecto y de su construcción referido a la conformación de las partes y el todo y la terminación de cada uno de sus elementos. Por citar un ejemplo, si un apoyo aislado se construye con concreto armado, este material ha de aparecer en el exterior como su acabado; surgiendo así terminaciones más o menos rugosas, y hasta la presencia de las tiras de madera de la cimbra, si bien lo fundamental consiste en que el concreto u hormigón ha de quedar visible. Esta versión obligaba a que una losa de concreto en el techo de una habitación debería de acabarse de igual manera, con el concreto aparente, tal vez hasta con la cimbra de madera a la vista o, si acaso, con un acabado de pintura que permitiera apreciar la textura obtenida con las tiras de madera del cimbrado incrustadas en la superficie. De preferencia, el material de construcción debería verse por fuera, en ello consistía la ornamentación de la arquitectura aquella; es decir, que en su época desaparecían prácticamente los recubrimientos sobrepuestos. Por ello se criticaban las edificaciones de entonces como carentes de acabados, sobre todo si se comparaban con estilos como el barroco recubierto totalmente de yeserías, relieves y pinturas de todo tipo. Así era la arquitectura que se hacía en México a mediados del siglo xx. Si un apoyo aislado se cimbraba cuadrado hubiera sido inconcebible camuflajearlo como un cilindro y viceversa.

Un ideal para levantar una pared era un ladrillo o un bloque de barro prensado y vidriado por las caras que quedarían expuestas, material como el que se ideó y fabricó para la construcción de la Ciudad Universitaria de 1954 de la Universidad Nacional Autónoma de México, que prácticamente no requiere mantenimiento y que todavía presta servicio. Para la arquitectura industrial de las obras de Félix Candela resultaba propicio el *block* de cemento de 20x20x40, al cual no se le administraban recubrimientos. Cierto es que para sostenerlo se hacía necesaria una trama ortogonal de castillos y cadenas, y el refuerzo con estructuras de alambrón ligadas entre sí y con la trama general de la pared que, de preferencia, no aparecerían a la vista con objeto de no alterar la continuidad del *block* de cemento. Estas paredes eran independientes de las cubiertas; con frecuencia se resolvían con cristaleras para no interrumpir las secuencias visuales.

Si llegaba a verse algún castillo o cadena, siempre dentro de un estricto orden visual, no pasaba nada porque se cumplía con la necesidad de proclamar la sinceridad arquitectónica. Vemos que para obtener limpieza en las terminaciones había que elaborar complicados sistemas constructivos. Los paraboloides hiperbólicos de aquellos tiempos cumplían plenamente con los postulados teóricos; las placas alabeadas de concreto armado que los conforman, de cuatro centímetros de espesor las más de las veces, no llevan sobreposiciones ni por dentro ni por fuera. Desde luego que el concreto podría quedar a la vista por debajo, siempre que no se viese alterada su apariencia por errores en el colado, tales como zonas de "cacarizos", es decir, donde por defecto del colado no penetraba la revoltura de cemento, arena y agua entre la grava y se des-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

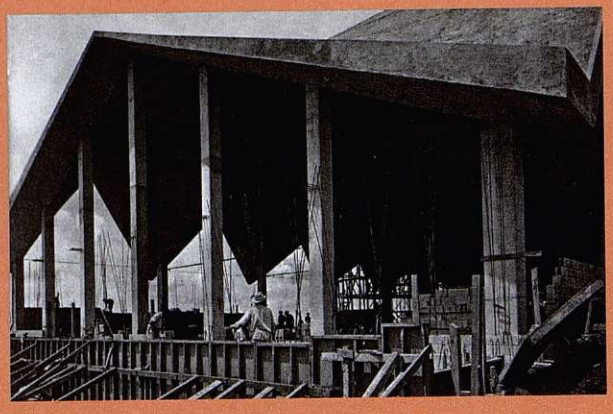


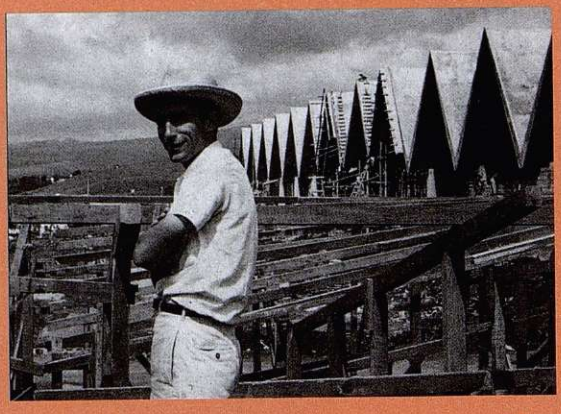
(F. 10)



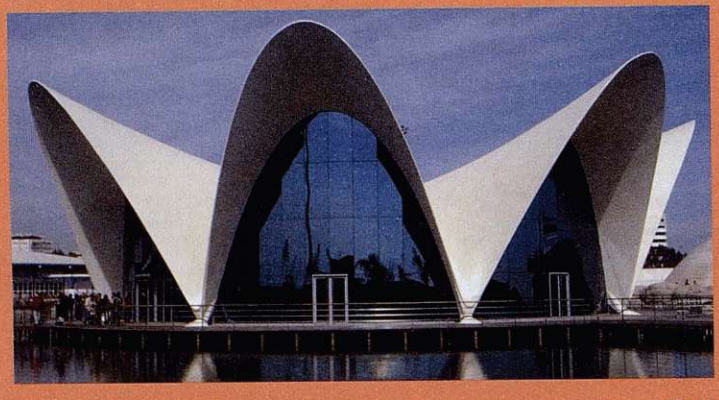


(F. 11)

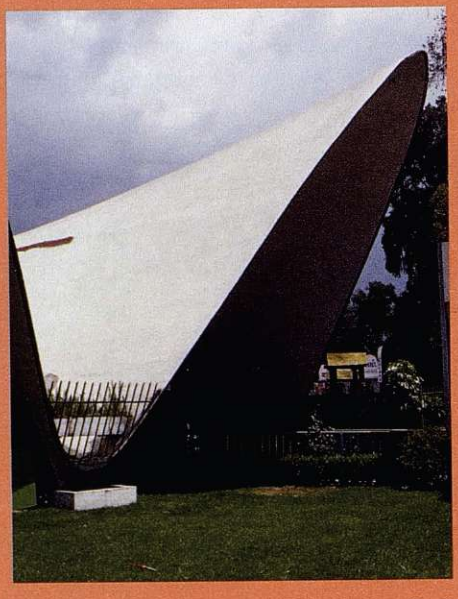




(F. 12)



(F. 15)



(F. 16)

(F. 10)

Fábrica de Ron Bacardí
Fachada de la nave de embotellado, 1982

(F. 11)

Paraguas en los almacenes de la fábrica
de Ron Bacardí, 1982

(F. 12)

Fábrica de cartuchos deportivos en
Cuernavaca, dos vistas y Juan B. Artigas, 1961

(F. 15)

Valencia, edificio en la Ciudad de las Ciencias
y de las Artes, 2003

(F. 16)

Restaurante Los Manantiales en Xochimilco,
detalle de un voladizo, 2002

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

continuaba la superficie de la membrana. Si esto llegaba a suceder, por diminuto que fuese el tramo, como recurso de obra, se rellenaban los pequeños huecos y se pintaba encima con cemento diluido en agua; era muy difícil disimular la falla de fabricación sin que nadie se enterase. Aun así, y en cualquier caso, y por la acción del tiempo, sería necesario pintar las superficies regladas con un color liso que no alterase su continuidad. La placa por el exterior debe impermeabilizarse, labor extremadamente difícil dada la tecnología del momento y que en lugares como la Planta Bacardí requiere de mantenimiento profesional constante, tanto en la nave de embotellado como en las series de paraguas de los almacenes de materias primas y productos terminados, sin contar las amplias superficies techadas que cobijan las estanterías donde se estiban los barriles para añejar el ron.

Al no requerir de acabados sobrepuestos en estos sistemas constructivos se abarata la fabricación; ésa era otra cualidad de las estructuras de Candela, su economía, de ahí parte del éxito de sus sistemas constructivos. Como vemos, era necesaria una tecnología edificatoria que se fue afinando durante los procesos de invención y construcción, de manera que se hacía indispensable también una mano de obra sumamente especializada que había que preparar.

Comprendemos de esta manera que la belleza de los paraboloides hiperbólicos no es gratuita, se requiere de complejos sistemas estructurales de construcción y terminación que no alteren la limpidez de las formas geométricas finales, las mismas que deben aparecer con enorme claridad para ser captadas de un solo golpe de vista; para lograr lo que se conoce como la "difícil sencillez". La abstracción de las formas, la economía de material requerido por estas construcciones y la necesidad que Candela sentía de cumplir con el postulado de la sinceridad arquitectónica le llevaron a desarrollar una abstracción en todos y cada uno de los elementos que constituían sus creaciones: si el esfuerzo de una cubierta laminar se analizaba inclinado, inclinado sería el apoyo correspondiente, sin más complicaciones, de una claridad meridiana. Como dichos elementos enviaban cargas también inclinadas sobre el terreno, para que no se abrieran las estructuras colocaba tirantes en diagonal si la planta era cuadrada, o paralelos a los lados cuando la planta era rectangular. Con eso sería suficiente. Esos tirantes quedaban bajo tierra para que la cimentación transmitiera únicamente fuerzas verticales al terreno. Y así ocurría. En ocasiones ni siquiera eran necesarios los apoyos aislados dado que la propia membrana se incrustaba en el terreno, como en los picos que anclan el paraboloide de la iglesia de Palmira, en Cuernavaca.

Cuando el diseño estructural de la cubierta implicaba formas complejas que debían recargarse en postes verticales, los tirantes metálicos postensados se ubicaban encima del capitel de los apoyos. Tal es el caso de la fábrica de Cartuchos Deportivos de México, filial de la Remington americana, construida cerca del pueblo de Ahuatepec, sobre el valle de Cuernavaca, en la cual me tocó ser residente de obra hacia 1961, laborando en Cubiertas Ala con los hermanos Félix, Antonio y Julia Candela Outeriño.

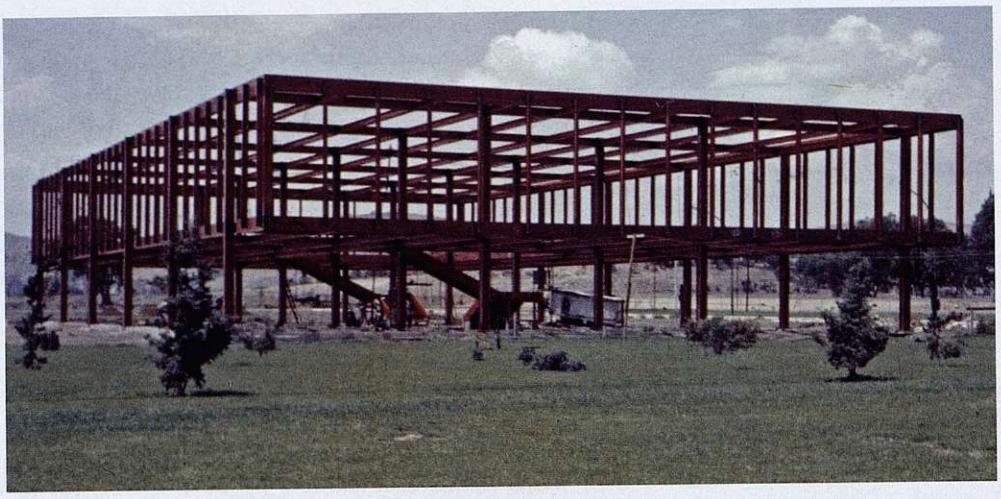
Claridad en la forma que también perseguía otro coloso del momento, Mies van der Rohe, cuando dijo que la limpieza de proyecto de sus edificios era posible porque enviaba al sótano, donde no se viera, todo aquello que pudiese complicar o afear la apariencia de sus modelos; lo cierto es que las soluciones de sus sótanos son sensacionales. Es sabido que en la fábrica del Ron Bacardí, junto a los edificios de Candela se levantó un edificio de oficinas proyecto del mencionado arquitecto germano-americano. Van der Rohe, siendo que trabajaba con estructuras metálicas, pero en busca de aquella economía estructural que lo caracterizaba, levantaba los postes verticales de sus edificios hasta las trabes horizontales de entrepisos y cubiertas, entrambos ubicaba otras columnillas de unión y refuerzo que servían al mismo tiempo para sostener los inmensos cristales de las fachadas, de manera que con la estructura resolvía simultáneamente además de las cualidades estéticas de sus obras las necesidades de uso. Es posible encontrar en sus proyectos una economía de materiales y forma paralela a la de Félix Candela, aunque sean muy diferentes las soluciones; ambos perseguían exaltar el protagonismo del espacio arquitectónico en continuidad a pesar de la enorme diferencia de los recursos edilicios empleados por cada uno de ellos. *More is less.*

Ese estar imbuido del lema de la sinceridad arquitectónica obligaba a nuestro protagonista a repudiar las formas que despreciaban la lógica estructural, las que faltaban al sentido ético implícito en dicho postulado, como el proyecto de la Ópera de Sidney, en Australia, que tantas dificultades creó y tanto dinero requirió para ser edificado, digamos que con calzador, o como el del pseudo-paraguas del patio del Museo Nacional de Antropología e Historia de la Ciudad

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 13)

Mies van der Rohe, estructura del edificio de oficinas, c. 1960



(F. 14)

Mies van der Rohe, edificio de oficinas y detalle del marco de aluminio de una puerta antes de que la cambiaran, modificación que impide saber por donde se entra, 1963





de México, resuelto con estructura metálica que sobresale por encima del poste central y con tirantes; claro que como no se le ven las tripas no se entera nadie, mientras que otros no se quisieron enterar. En ambos casos las soluciones se alejaron de la lógica constructiva, según su momento histórico aquéllas eran falsas estructuras.

Del hombre

Félix Candela impartió cátedra en la entonces Escuela Nacional de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México, dirigió uno de los talleres en la Ciudad Universitaria y después compartió el de Castañeda Tamborrel. En las clases de proyectos y estructuras los estudiantes, sobre la mesa de trabajo, teníamos ocasión de departir con él, sin percatarnos de que nos dedicaba su tiempo, individualmente a cada uno de nosotros, uno de los mayores creadores de estructuras del siglo XX. Eran contados quienes destacaban por entonces en dicho campo: el italiano Pier Luigi Nervi, el norteamericano Buckminster Fuller y el alemán Frei Otto, no había más.

Era notable su interés por la docencia; en la universidad coincidió con otros profesores del éxodo republicano español, como el crítico de arte Juan de la Encina, fundador hace poco más de cien años del Museo de Arte Moderno de Madrid, origen del Museo Reina Sofía, José Luis Benlliure, nieto del ilustre escultor Mariano Benlliure, Juan Antonio Tonda, Enrique Martorell Daltabuit y Antonio Encinas, Pepita Saisó, Imanol Ordorika, Antonio Peyrí, por citar sólo a unos cuantos colegas. A mediados del siglo XX no pensábamos que hubiera arquitectos surgidos de la España republicana dignos de ser considerados como grupo, hoy la perspectiva ha cambiado y nos reconocemos, los de aquellos tiempos junto a sus descendientes como colaboradores con presencia en la cultura de México.

En una ocasión, al ver que los jóvenes profesionistas de su despacho estábamos preocupados porque había poco trabajo, cuando le preguntamos qué debíamos hacer no respondió directamente,

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

nos dijo que nuestra obligación era prepararnos, prepararnos en aquello a lo que nos queríamos dedicar, fuere lo que fuese; que a todo el mundo se le presentaban oportunidades en la vida, que quien estaba preparado podía asirse de la ocasión que la vida le deparaba, mientras que a aquel que no lo estaba podían pasarle por delante todas las oportunidades del mundo, que nunca se enteraría de ello ni podría sacarle provecho. Difícilmente pueden idearse mayores consideraciones de orientación y optimismo dirigidas a la educación.

Un buen día me mandó llamar a su estudio, la habitación era muy sencilla aunque también imponía; al darse uno la vuelta para salir, en la pared, junto a la puerta de entrada relucía un cuadro con el dibujo de un toro de trazo seguro, redondeado, de fuerte expresividad, cuya dedicatoria decía algo así como "para Félix de Picasso". Así pues, era, ni más ni menos, que un toro de Picasso dedicado personalmente. Me atrevería a decir que, en reciprocidad, Picasso debió de haber construido una estructura de Candela en el jardín o en el huerto de su casa.

Porque así era, el nombre de este egregio personaje hispano mexicano queda registrado junto a los del mismo Pablo Picasso, Juan Ramón Jiménez, Pablo Casals, Luis Buñuel, José Gaos, Manuel de Falla y tantos otros ilustres expatriados. Se consideraba a sí mismo arquitecto mexicano y lo era, puesto que aquí desarrolló sus sistemas de cálculo y realizó los sistemas tecnológicos y estéticos que le dieron fama, además, también aquí recibió su título de arquitecto. Pocas veces se ha tomado en cuenta que Félix Candela fue el primero en dar a conocer internacionalmente la arquitectura del siglo xx de México; acreedor de premios en Europa y América, impartió conferencias, realizó publicaciones y trabajos también fuera del país.

Ocupó lugar destacado entre los de su profesión, semejante al de los muralistas Orozco, Rivera y Siqueiros, en la música Moncayo y Revueltas, en literatura Juan Rulfo, Octavio Paz y más jóvenes García Márquez –sí, de México también– y Carlos Fuentes. Entre los arquitectos después llegaría el reconocimiento internacional a Luis Barragán, Pedro Ramírez Vázquez, Agustín Hernández, Carlos Mijares, Artis Spriu, Teodoro González de León, Ricardo Legorreta y muchos más. Gracias a todos estos nombres México es conocido y respetado también en el extranjero. En sus últimos años, y de vuelta temporal en España, colaboró Candela con Santiago Calatrava, quien lo considera su maestro hasta el punto de expresar que sin sus aportaciones no le hubiera sido posible llevar a cabo algunos aspectos de su creatividad, reconocimiento que honra al maestro y al discípulo. Ahí queda, también de borde libre, alguno de sus edificios en el sinigual conjunto edilicio de la Ciudad de las Ciencias y de las Artes de Valencia.

Sirvan estas líneas como un merecido homenaje al hombre de bien en la profesión y en la vida, quedan en el tintero otros aspectos interesantes de aquellas actividades, que ya comentaré en la "primera ocasión que se me presente".

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Homenaje a Félix Candela

Fernando Serrano Migallón
Profesor Titular de Derecho Constitucional
Universidad Nacional Autónoma de México UNAM y del Colegio profesional de México

Alphonse de Lamartine solía decir que la casualidad nos da casi siempre lo que nunca se nos hubiese ocurrido pedir, y es que acaso extrañará que un abogado, iletrado en arquitectura, sea quien rinda homenaje a la memoria de Félix Candela.

Atribuible -sin duda- a la casualidad y sus designios, yo nací y viví en la misma casa donde Candela tenía su despacho: Cubiertas Ala, casa que estaba ubicada en el número 123 de Ramón Guzmán, donde, gracias al autoritarismo de un Regente de la Ciudad de México, nos encontramos, de la noche a la mañana, sin previo aviso y sin que mediara mudanza, en otra calle, en la Avenida Insurgentes Centro.

En ese edificio vivíamos, en el número 204, su madre Doña Julia y su hermana Julia -La Chatina- y enfrente a ellos, en el departamento 201, mi familia y yo. Ahí conocí desde niño a Félix Candela. En charlas interminables le oí hablar de la casa familiar en Crevillente, de la zapatería paterna en la Calle Mayor del viejo Madrid, de la primera radio de galena que conoció, de la Guerra Civil y de su guerra personal, de la muerte de su primo en el frente republicano, del exilio, de su exilio particular.

En febrero de 1939 caía el frente catalán y el 1° de abril terminaba el conflicto. España y la República perdían la guerra y sobre el país se abría una larga noche de miedo y tristeza.

Una gran parte del pueblo español cruza la frontera, haciéndolo con plena convicción de la justicia de su lucha, de la razón de sus creencias y en su derecho a ser libres. Con ellos pasaba Félix Candela, quien sería internado, como muchos de sus compatriotas, en los campos de concentración; en su caso, el de Saint Cyprien.

Félix Candela no era todavía el mago de las estructuras en que se convertiría. Entonces era un prometedor arquitecto, graduado en Madrid y con proyectos de estudios de postgrado en Alemania que la guerra había truncado. Su documento de identidad lo presentaba como Capitán de Ingenieros del Ejército Republicano español; la triste experiencia del campo de concentración sería su despedida de Europa.

La vida y la obra de Félix Candela son una imagen del transtierro español en México. Es un diálogo que todavía no termina y cuyo lenguaje se va transformado con el paso del tiempo; es la historia del hombre que viene joven a una tierra que no conoce pero que lo recibe con esperanza y con libertad. Una tierra de la cual tomará elementos que le eran hasta entonces desconocidos. Se inicia una relación personal entre el individuo y su nuevo entorno, una búsqueda de un "ideal ético y estético, hecho de bondad y de belleza", como dirían Reyes y Gaos.

La estética que plasmó en México Félix Candela nace de un diálogo de culturas. Si bien estaba cercanamente relacionado con las corrientes estéticas propias de la Europa de su tiempo, la llegada a México le descubre la extraña belleza del altiplano y entonces sabe, como pensaba Moreno Villa, que para colaborar con la reconstrucción de un México que se levantaba de años de violencia y lucha armada había que valerse tanto de elementos mexicanos como de los que venían con él.

Igual que en la existencia de Candela, su obra es también fruto de una apertura a lo diverso, a la otredad que con el tiempo, irremediablemente, se convertiría en parte indivisible de su ser.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 1)

(F. 1)
Iglesia de San Antonio de Huertas, Tacaba, México, 1956

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Esta preocupación no es sólo la búsqueda profesional, sino algo más trascendente, una actitud comprometida con la vida.

El sentimiento vital del exilio español también tuvo su base en una necesidad de sobrevivir, una fuerte sed de vida y como fin su incorporación a su nuevo país.

El creador une su experiencia con la tierra que lo ha recibido; de manos españolas, resultan obras mexicanas. El arquitecto desarrollaría lo mejor de su obra arquitectónica en México; y es que gracias a su natural impulso de retribución y justicia, encuentra en su vida como universitario la mejor manera de permanecer entre nosotros, aunque nosotros ya éramos suyos.

Félix Candela fue profesor de la entonces Escuela Nacional de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México. Contribuyó a formar una nueva generación de arquitectos que verían en su labor una forma de rescatar los valores nacionales y ponerlos en contacto con la creación universal de su tiempo. Existe en la labor universitaria de Candela un impulso de educador antiguo, de actitud colaboradora, de formación en grupo. La técnica es sólo un camino, casi un pretexto para la comunicación de valores éticos y estéticos con sus alumnos.

Félix Candela, el creador y el hombre, se hizo mexicano. Como muchos otros de sus compañeros, que lo hicieron desde lo profundo de su ser individual, profesional y artístico, Candela en 1941 se naturaliza mexicano.

Desde ese año es un "docente mexicano", pero, a pesar de ello, en él no existe un salto sustancial entre el ser español que, sin embargo no dejaba de ser, y el ser mexicano, que ya lo era desde antes. Estamos en presencia de una evolución de conciencia; es la respuesta de un hombre frente a su circunstancia.

Félix Candela es un hombre que destruye estereotipos y construye realidades; algo que pueden agradecerle sus compañeros de exilio es el hecho de haber cambiado la fama que tenían de destructores e incendiarios de iglesias por la imagen de constructores de templos.

Para cumplir consigo mismo, no hacen falta grandes manifiestos y ni siquiera una declaración en alta voz, simplemente hay que comprende en qué consiste el deber personal y cumplir con él; el destierro comprende dos sentidos: en uno es el desarraigo del origen y en el otro es el corresponder a una nueva situación; es así una fuente de alegrías y de lágrimas que hay que vivir; no hay que invocarlo a cada paso y en cada obra.

Cuando le comunicaron a Antonio Machado que tenía que pasar la frontera francesa le comentó al emisario que para los militares, los estrategas y los políticos la guerra estaba perdida, pero no para los poetas. La evolución política posterior ha demostrado que la democracia y la libertad vencieron. El tiempo le dio la razón a Candela y a los suyos.

Si hay algo que recordar en Candela, más allá de sus obras que son ya símbolo en nuestros espacios urbanos, es haber aceptado, pese a todo o gracias a todo, el reto de cumplir consigo y con su época; sus obras dejan de ser objetos materiales para convertirse en símbolos.

Es por eso, por ~~a~~aquello y por esto; por todo: muchas gracias a Félix Candela.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

La huella de Candela. La arquitectura con las estructuras

José Ávila Méndez
Arquitecto
Profesor Universidad Nacional Autónoma de México UNAM

La arquitectura es la construcción de formas artificiales, para transformar un sitio. Si bien la humanidad dispone ahora de mayores medios que nunca, lo que supondría lograr mejores realizaciones, sin embargo el problema es mayor que en otras épocas, pues se han perdido de vista los fines. Por eso es relevante el caso de Félix Candela que, gracias a una mente tenaz, logró el dominio de medios constructivos y técnicos con excelencia pero sin perder de vista su objetivo fundamental, hacer arquitectura con las estructuras.

Félix Candela se aplicó dentro de la arquitectura en el campo de las estructuras y logró ser uno de los más destacados constructores del siglo XX. Abarcó diversos campos, desde su interés fundamental en la cuestión técnica, que le permitió la realización de interesantes estructuras arquitectónicas, hasta los problemas ambientales del planeta, con sentido humano. Estudió todo lo relativo a la transformación del espacio habitable, logrando aportar en diversos campos con ideas y realizaciones.

Nuestro mundo, al igual que el universo y finalmente nuestro entorno más inmediato, están formados por espacio y materia. La semejanza del universo con lo que sucede en la arquitectura, como lo hizo notar Umberto Eco, es la formación de un mundo dentro de un universo gobernado por las mismas leyes, como las de gravedad. Así la arquitectura resulta equivalente a un nuevo planeta formado por unidades, compuesta por vanos y macizos, como el ser y la nada. Las masas son lo que se construye, pero con el fin de crear espacio que cobije y brinde mejores condiciones que la intemperie para atender las necesidades y apetencias humanas. La relación en las construcciones de las masas y los vacíos han evolucionado, buscando la transformación de la materia de manera más eficiente para cumplir varias misiones como protección y contención del espacio, que sirva de marco a la vida civilizada, para lo que se requiere dotar a los materiales de una estructura con una forma que les dé vida. La historia de la humanidad está registrada en la evolución de las formas estructurales para lograr el espacio. Inicialmente se invertía una gran cantidad de materiales para este fin, ante el cual Candela logró aportar con sus propuestas estructurales, basadas en las cualidades de la forma, el máximo de espacio con el mínimo de materia.

El inicio fue en 1949 con el proyecto y construcción de una escuela en Ciudad Victoria Tamaulipas, que contiene las características principales de su futuro desarrollo, como trabajo de investigación, experimentación, incluido el proyecto arquitectónico, hasta la construcción de un espacio para escuela único, sin antecedentes, y todavía en uso, de alta calidad arquitectónica e innovación técnica estructural, combinando arcos parabólicos con pequeñas catenarias colgantes utilizando cimbras costales.

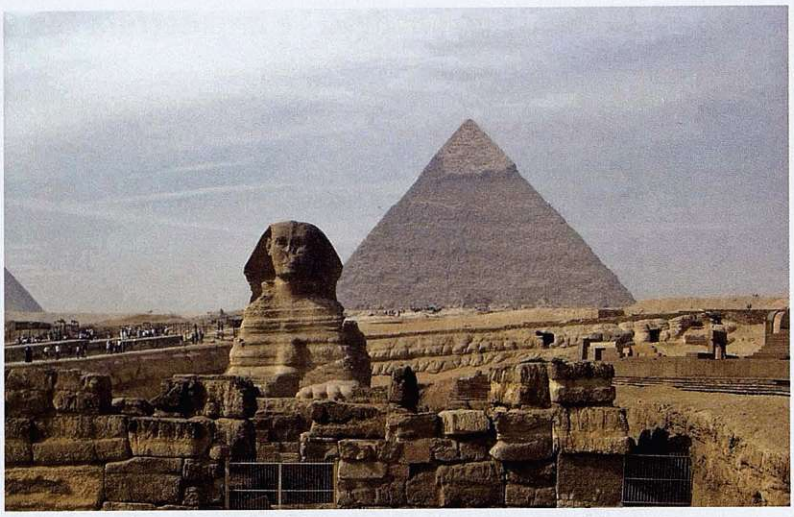
Muy similar resultó la estructura del pabellón de Rayos Cósmicos en Ciudad Universitaria construido en 1953. Aunque Candela formalmente sólo se encargó de la construcción, se puede apreciar por la similitud con la escuela de Tamaulipas la aplicación de sus ideas en la cubierta y también en los apoyos, que inclinó como un acierto estructural y compositivo, además de consistente, con el vocabularario utilizado a lo largo de toda su carrera.

La arquitectura es una construcción artística, como la define Frei Otto, uno de los arquitectos dedicado a las estructuras más reconocidos del siglo XX, amigo y admirador de Candela. La gran problemática de la arquitectura está en resolver la composición de los distintos elementos para

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 1)

Pirámide, cuerpo estereotómico, geometría pura.
Esfinge, forma analógica



lograr una forma con espacios exteriores e interiores que obedezcan a su vez a las tres distintas razones geométricas siguientes:

- La organización y utilidad del espacio, designado como funcionamiento.
- La estabilidad física de la construcción ante las fuerzas de gravedad, con lógica de las formas materiales.
- La expresión de la forma como lenguaje.

Cada obra presenta distintas prioridades dentro de estas tres categorías. En el caso de las cubiertas ligeras que propuso y construyó Candela, cubren espacios típicos con separación entre apoyos de entre 15 y 30 metros, en las que privilegió la unidad de la forma arquitectónica como totalidad, pero regida por la forma estructural resistente que resultaba de la síntesis de múltiples determinantes del espacio requerido, como expresión de las fuerzas mecánicas para mantener la cohesión de los diversos elementos, lo que logró gracias a la calidad estructural.

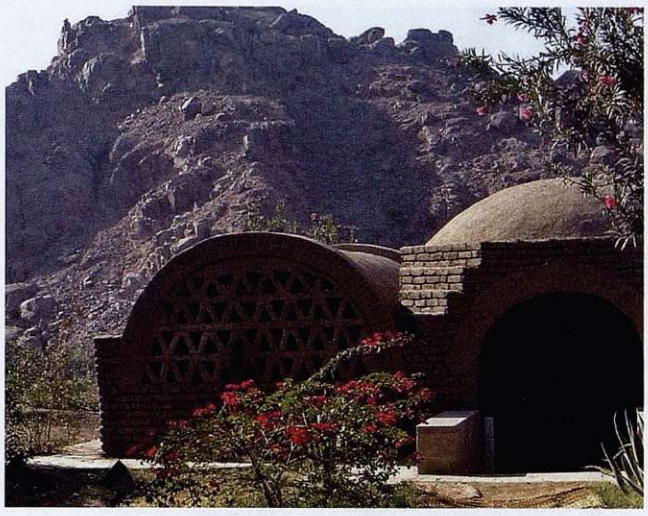
Las cualidades compositivas de las formas arquitectónicas son función de la unidad que alcancen, ya que se requieren distintos elementos y sólo se unifican en torno a un fin común, que incluye su funcionalidad y su expresión plástica. Son muy pocas las obras arquitectónicas que reúnen las cualidades funcionales, estructurales y expresivas mencionadas, y existen enfoques parcelarios que buscan justificar las soluciones divididas, en donde la principal dicotomía es entre el arquitecto y el ingeniero, al que se le supone subordinado como un complemento pero sin coautoría en la obra. Posiblemente a partir de este enfoque, hay quienes han insistido en que Candela era un buen ingeniero que colaboró y ayudo a los arquitectos considerados entonces como autores de la obra arquitectónica. El enfoque integral que adoptamos sin embargo ubica a Candela como un arquitecto constructor. Es importante destacar las obras en que el encargo fue directo y la autoría indiscutible. Es el caso de la escuela de Tamaulipas al inicio de su periodo como realizador de cascarones, la Medalla Milagrosa en la parte intermedia y la cubierta del Palacio de los Deportes, como ejemplos del carácter integral de la tarea como arquitecto que desarrolló a lo largo de su vida.

En muchas edificaciones del siglo XX se dio el cierto divorcio entre el espacio arquitectónico y la solución de la estructura sustentante, manejándose como algo adicional que se buscaba reducir al máximo sobre todo como expresión visual, en particular en los techos, fabricados como planos, pintados de blanco para que no contaran, sacrificando la eficiencia estructural, la economía y la unidad conceptual de la obra. Sin embargo ese enfoque es el que más predomina sobre todo en las edificaciones basadas en múltiples entrepisos. Separar la arquitectura de la ingeniería es distorsionar la realidad suponiendo que la arquitectura es algo cercano a la decoración y la ingeniería como un mal necesario, recurso técnico indispensable pero inferior al arte. Así el ideal de la arquitectura sería prescindir de esa molestia que según este enfoque impide, por falta de comprensión del ingeniero, lograr la expresión arquitectónica; a su vez reniega de las intenciones de hacer espacio arquitectónico subordinando la estructura al ingeniero que se defiende e intenta resolver el espacio como si sólo fuera un problema técnico, considerando la

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 2)

Edificación con arcos y bóvedas, forma tectónica, en la isla de Píale en Asuán, Egipto
(Fotografía José Ávila)



arquitectura como un cuestión fuera de la lógica y la razón constructiva. Un caso que menciono Candela en este sentido fue el de la Ópera de Sidney, en que el proyecto arquitectónico convenció con unos dibujos de cubiertas estéticamente atractivas, pero que en realidad no tenían sentido en el aspecto estructural, pues requirieron cambiar de material y hacerlas de acero para poderlas construir, a un altísimo costo y con una gran confrontación profesional, en la que prevalecieron al frente de la obra los servicios del ingeniero Ove Arup.

La realidad arquitectónica es una sola, se expresa en propuestas formales que deben surgir de una idea, no se pueden dividir, ni se pueden separar los distintos aspectos humanos y materiales. Al contrario, su calidad depende de la fuerza de integración y correspondencia que logre, por eso es importante entenderla como una realidad compleja, que requiere entender sus categorías conceptuales. Las propuestas formales deben surgir de los conceptos y el entendimiento de los problemas para evitar el prejuicio y el plagio, que resultan demasiado comunes y en ocasiones involuntarios. Las grandes obras arquitectónicas son propuestas integradoras y una manifestación de la inteligencia y de la sensibilidad de cada época, basadas en fundamentos teóricos, desde los de la percepción, la óptica y la física, que interesó a Candela, o sea en la respuesta de la materia a las fuerzas de gravedad y el papel resistente de la forma para lograrlo con la más alta eficiencia. Pero no todas las formas utilizadas para la realización arquitectónica son una expresión de la estructura. Podemos decir que a lo largo de la historia se ha recurrido fundamentalmente a tres tipos de formas:

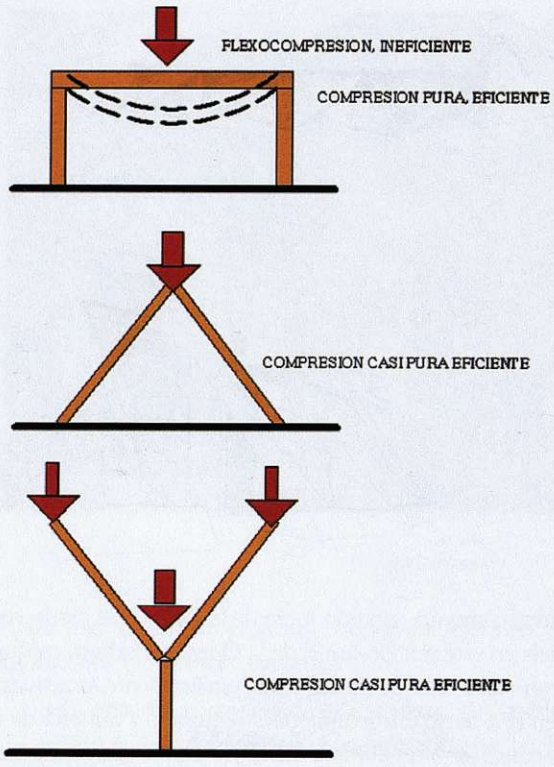
- Las estereotómicas, derivadas fundamentalmente de las referencias con la geometría pura, desde los sólidos platónicos predominantes por milenios y destacados en el siglo XX por la legibilidad que las formas basadas en la geometría pura ofrecen al observador y la fuerza expresiva que les confiere. Éste fue un tema que le interesó mucho a Candela, que realizó varios escritos respecto al tema.
- Las analógicas, que son más aplicables a la escultura, que busca representar otra forma como fue en el pasado con las de la naturaleza, por analogía.
- Las formas tectónicas en menor medida, que inician con elementos aislados como los arcos y bóvedas de medio punto y evolucionan a formas más eficientes estructuralmente, como las catenarias que son las más eficientes que ha conocido la humanidad, y que según Nervi, alcanzan la cúspide en su evolución y ahora queda su perfeccionamiento, como lo hace y experimenta Candela, inicialmente en escalas prudentes que transforma en parabólicas, muy cercanas al trabajo de las catenarias, en claros con escalas intermedias. También es un tema sobre el que escribió, sobre todo en su libro en defensa del formalismo.

Candela se interesó y manejó básicamente las formas tectónicas, desde su concepción básica, como investigador, hasta su construcción, apoyado en dos aspectos: su bagaje conceptual para comprender el fenómeno físico, al mejor estilo de Galileo, y al dominio que logró desde joven de la herramienta que promovía el iniciador del pensamiento científico; y la "geometría", lo que

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 3)

Columnas diagonales en la aportación a un nuevo lenguaje arquitectónico



le permitió encontrar siempre la forma de acomodar la materia para lograr una cantidad extraordinaria de nuevas soluciones con innovaciones diversas, que le permitieron inscribirse en la historia de la civilización, al participar con sus propuesta formales y constructivas en la evolución de las estructuras y de la arquitectura.

Personalidad

La personalidad de Félix Candela tuvo características únicas, como lo consideraron Frei Otto y Pier Luigi Nervi, pues reunió en una sola persona cuatro mentes generalmente en conflicto, como: constructor, arquitecto, ingeniero y la de investigador. Aunque la formación académica de Candela fue la de arquitecto, y creo que prevaleció, sin embargo prefirió auto designarse como constructor para ahorrarse problemas, se presentaba casi como un humilde contratista de obra. Identificó la arquitectura con la solución formal para resolver la estructura de manera óptima, utilizando como instrumento fundamental la razón geométrica que le permitía ver el comportamiento físico de las estructuras como generadores del espacio, renunciando a cualquier decoración que no fuera el drama de la forma resistiendo las fuerzas de gravedad y la luz para enaltecer el espacio interior jerarquizando la forma estructural.

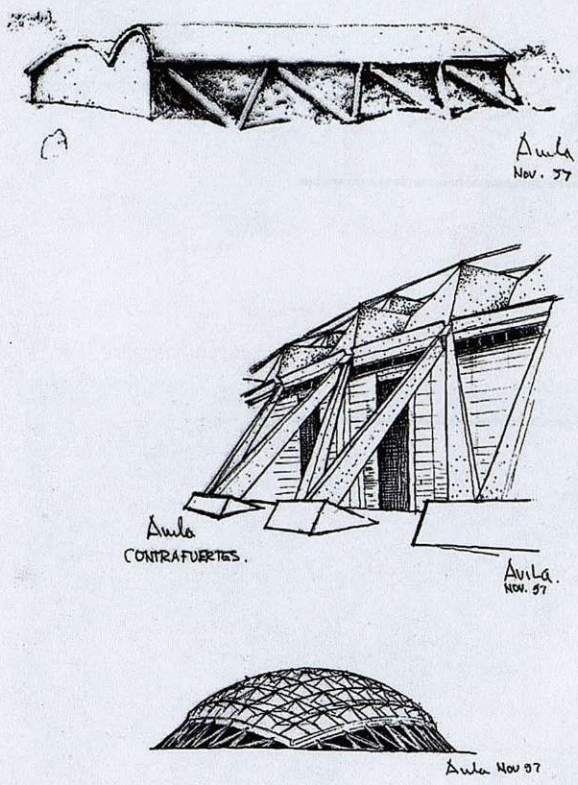
La arquitectura del siglo xx recurrió a nuevos materiales como el acero y el concreto armado, lo que permitió hacer edificios más grandes y más altos. El potencial de los nuevos materiales paradójicamente provocó en gran medida desinterés para expresarla; en cambio, se intentó ocultar al máximo la estructura en beneficio de la búsqueda de una percepción de continuidad, eliminando cerramientos o haciéndolos transparentes y los techos planos como un cielo artificial, como lo propone Mies van der Rohe. Candela tiene una preocupación a contracorriente que resulta una guía en toda su obra. En sus clases señaló al respecto los inconvenientes de los techos planos en contraste con el trabajo más eficiente de elementos como la columna, que trabaja a compresión pura sin desperdiciar materia, como sucede a los elementos colocados horizontalmente como las vigas, que producen una de las peores condiciones de trabajo, requiriendo gran cantidad de material para contrarrestar los esfuerzos combinados de los momentos de flexión en la repartición de esfuerzos, del cual la mayoría es un lastre.

Candela planteó una solución aplicada a las cubiertas, para equilibrar las condiciones de trabajo de columnas y vigas, que consistió en una mediación, al inclinar los soportes y sumarlos a las cubiertas, formando en unos casos formas similares a una letra "V" y en otras a una "Y", lo

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

(F. 4)

Aplicación del vocabulario utilizado por el arquitecto Félix Candela en la Ciudad Universitaria, en el Auditorio de la Facultad de Ciencias Químicas en 1953. Aportaciones: obra maestra, identidad con el sitio y su época, economía, tiempo de recursos, innovación, eficiencia estructural, procedimiento constructivo óptimo, vocabulario maduro



que le permitió lograr mayor eficiencia con menos material y una gran unidad plástica. Lo aplicó en el auditorio de la Facultad de Química de la Ciudad Universitaria.

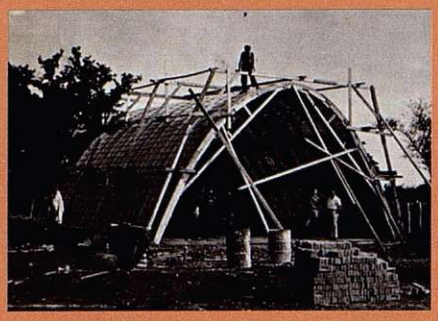
Ingeniero autodidacta e investigador en el campo de las estructuras ligeras, buscando antes que nada cómo construirlas, sin aceptar las condiciones establecidas por los expertos de la época basadas en excesivos esfuerzos en los análisis matemáticos, basados al final de cuentas, según Candela, en supuestos básicos desarrollados con un rigor innecesario para una finalidad practica. A él le interesaba construir las estructuras, no su análisis por sí mismas. Se rebeló contra los medios de análisis para lograr sus fines: realizar estructuras ligeras con los recursos y herramientas de las que disponía, los conocimientos técnicos adquiridos en la Escuela de Arquitectura y la experiencia de la guerra, que le permitió estudiar como en un laboratorio gigante sobre la forma de falla inducida de las estructuras, y que encontró se comportaban de manera distinta a como suponía la teoría. Así se formó su personalidad como ingeniero capaz de cuestionar el conocimiento institucional. Alguna vez le escuché, ante un fuerte cuestionamiento en una reunión de ingenieros en EEUU que le advertían de la imposibilidad de demostrar y aplicar sus propuestas, pasando las imágenes de las estructuras ya realizadas con sus propias herramientas intelectuales y fuera del primer mundo.

Candela se identificó con Galileo. En una plática contaba que, cuando estuvo convaleciendo de una operación, en el momento que despertó empezó a luchar contra los que lo atendían porque soñaba que era Giordano Bruno al que querían llevar a la hoguera por hereje; lo cual nos permite pensar que fue un rebelde dispuesto a enfrentar las inercias de los prejuicios y la intolerancia, completando así su afable pero fuerte personalidad.

Formación

La preparación de Candela resultó afortunada, pero llena de vaivenes de la fortuna en la cual resalta su temple para mantener un interés por hacer y saber cómo hacer estructuras y con ellas la parte de la arquitectura que él consideraba se le daba. Si consideramos que la educación no es sólo lo que se recibe en las escuelas, centradas en la instrucción, el factor más importante es el contexto, empezando por el familiar. El espacio, el sistema político, la competencia (como la que por cierto propicia el ejercicio de un deporte), el acceso a la lectura, la información, la riqueza de experiencias fueron como ya se ha mencionado en otros trabajos, un factor determinante para completar su formación, que resulto única, imposible de reproducir. Sin embargo podemos retomar su gran interés por la geometría para trasmitirlo a las nuevas generaciones.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 5)

Escuela construida en Ciudad Victoria Tamaulipas, en 1949 y en 2000



(F. 6)

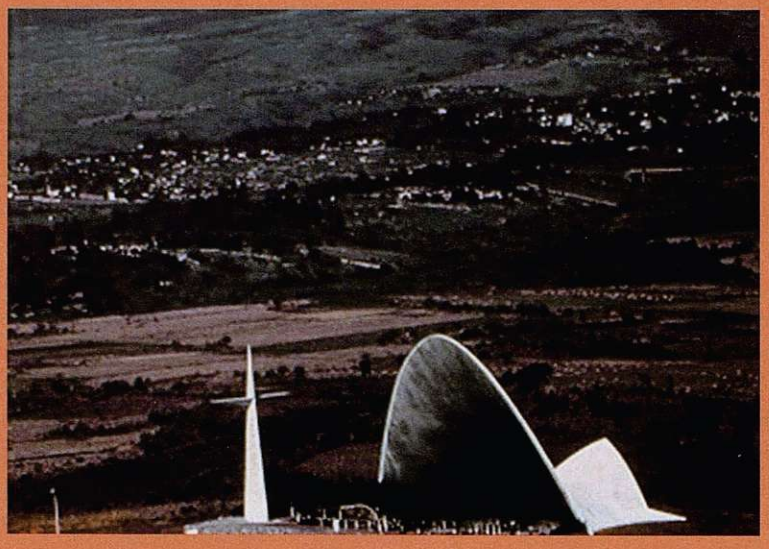
Paraguas, repetición y luz, además de economía, dignificación del espacio





(F. 7)

La planta de Bacardí, exterior e interior



(F. 8)

La iglesia de Palmira en Cuernavaca, Morelos

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Sitio

La vanguardia en la evolución de las estructuras correspondía en el periodo de postguerra a los países avanzados. ¿Por qué en México se dieron ciertas condiciones para el desarrollo y evolución de estructuras como los cascarones de concreto armado que propuso Candela? Finalmente estamos en un país con clima tropical en el que la protección principal ante el medio ambiente es proporcionar una sombra, y los cascarones son estructuras ligeras en concreto armado que resultan adecuadas para resolver los espacios típicos, los problemas de la industria y los centros de reunión,

La razón geométrica de la estructura basada en formas tectónicas y la exuberancia del entorno tropical producen, como expresión plástica, una síntesis dialéctica extraordinaria entre la geometría de la naturaleza en el entorno y la de la geometría de las cubiertas que trazan parábolas limpias en el paisaje, como el restorán Los Manantiales en Xochimilco.

Época

Octavio Paz decía: "La arquitectura es el testigo insobornable de la historia", y desde luego de cada época. El México productivo de la postguerra lo fue gracias a una coyuntura económica, política y cultural favorable para el crecimiento industrial, de infraestructura y equipamiento en el país En los años 30 se dio el último y más vigoroso impulso para materializar el programa social de la revolución mexicana, que coincidió con la llegada al país de los refugiados de la Guerra Civil española, contándose valiosos intelectuales y profesionistas, algunos en ciernes como Candela. También coincidió con la política del New Deal en EEUU, que propició un auge en la construcción. En los 40 los aliados fueron los triunfadores en la guerra, después de la destrucción y la desesperanza de la primera mitad del siglo, con guerras, revolución, depresión económica. Finalmente se dio esta época, que se denominó, como fenómeno económico. El "desarrollo estabilizador" en México, y de crecimiento industrial instalado en gran medida en la capital del país, fue sin duda de 1950 a 1970, una época de crecimiento económico y realización de obras materiales casi vertiginosa. La industria de la construcción tuvo su esplendor, que supo aprovechar Candela para desarrollar y construir estructuras y sus ideas sobre las mismas en un ciclo de evolución afortunado.

El gran problema del país, la desigualdad, lamentablemente se mantuvo, en aras de ese crecimiento económico. Sin embargo, a pesar de que los beneficios de algún modo permeaban a todos los grupos sociales, la famosa estabilidad basada en el convencimiento resultaba cada vez menos convincente y el ambiente de libertad para hacer se fue agotando. El famoso "ogro filantrópico" que señalara Octavio Paz fue abandonando la filantropía y el populismo paternalista, cerrando su ciclo de auge y las oportunidades de construir en la forma que lo hizo Candela.

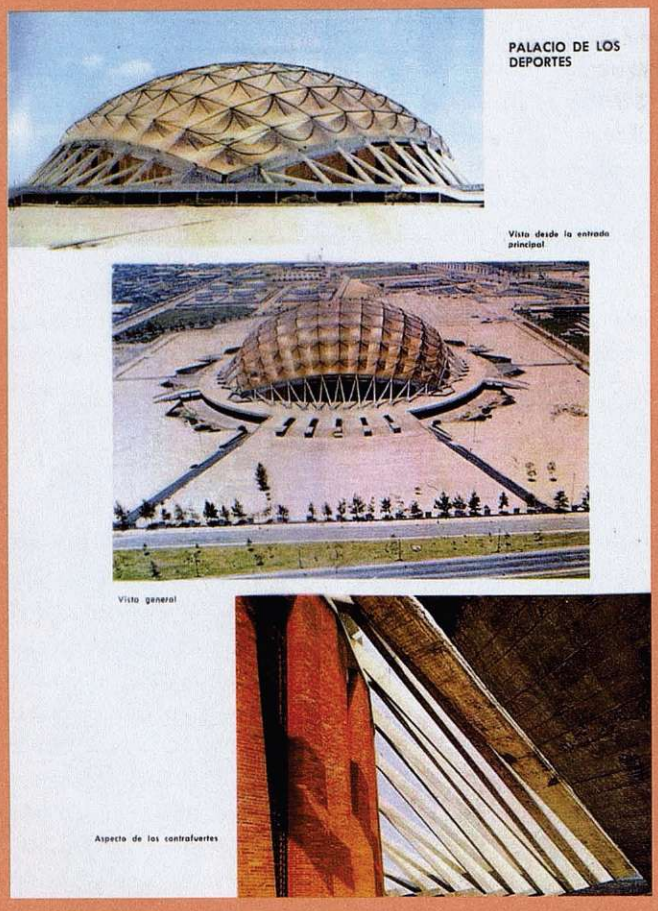
Circunstancias

La época era propicia para hacer obras, pero resultaba importante saber qué hacer y cómo. La oportunidad llegó cuando Candela había logrado una excepcional madurez, pues ya tenía claro lo que quería y cómo lograrlo. Ortega y Gasset planteaba el entendimiento de nuestra realidad como una dualidad en su famosa frase "Soy yo y mis circunstancias", en la que queda claro que somos responsables de nuestro destino en condiciones que nosotros no determinamos. En el caso de Candela las circunstancias parecieron desviarlo de sus objetivos, pero al fin las circunstancias de su nuevo país le dieron una oportunidad que supo aprovechar y que se agotó, obligándolo a una nueva migración para mantener oportunidades por cierto distintas.

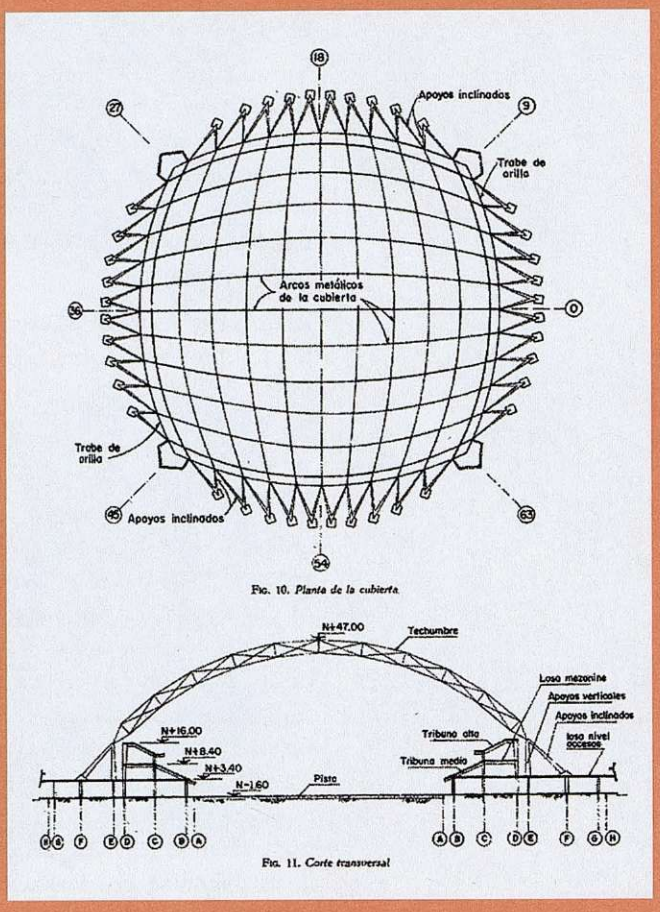
Producción

Candela realizador dejó un legado de más de 860 obras con base en la solución de cubiertas por medio de cascarones, con más de un millón de metros cuadrados construidos. Los cascarones son un producto de la inteligencia y el espíritu, en circunstancias peculiares en un país del tercer mundo, en un atípico auge económico y productivo. La oportunidad de crecimiento industrial superó cualquier pronóstico en el medio siglo XX, requiriendo el desarrollo rápido de la infraestructura y las instalaciones atendidas de forma acelerada y con poca planeación. Se concentró en la ciudad de México demandando la creación de espacios para la producción industrial y centros de reunión, que explican en buena medida la participación de Candela en

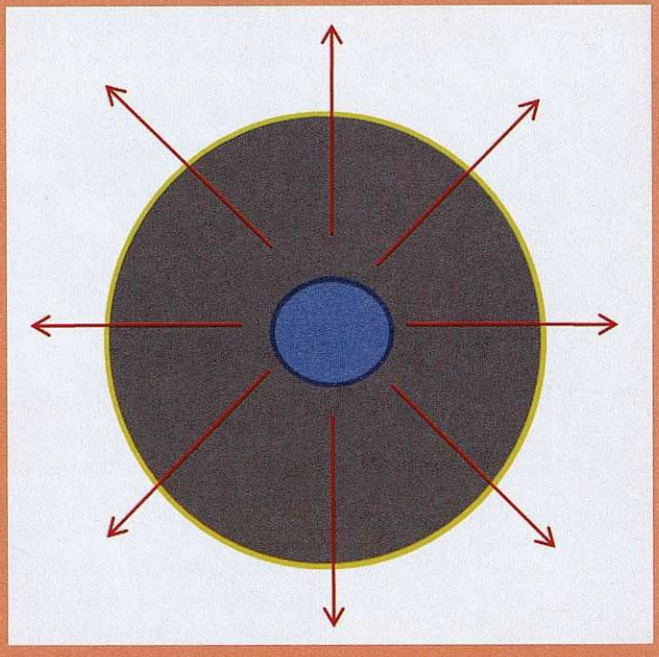
FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



(F. 9)



(F. 10)



(F. 11)

(F. 9)

Palacio de los Deportes de México, Olimpiadas de 1968. Reto para un país pobre frente a los logros de Roma y Tokio

(F. 10)

Planta de la cubierta del Palacio de los Deportes de México, 1968. Segmento de casquete esférico, geometría pura. Forma con cualidades estereotómicas y tectónicas. Corte de la cubierta con arcos peraltados, las compresiones transmitidas por las diagonales de la celosía

(F. 11)

Esquema de la nueva solución: círculos máximos que reparten fuerzas con mayor equilibrio entre centro y periferia. Contradicción en el sistema radial de una bóveda clásica, concentra nervaduras al centro, donde menos se necesitan, y las dispersa donde más se necesitan

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

este proceso con su propia producción espacial en las condiciones ya mencionadas. Desde la concepción espacial, solución estructural, análisis y cálculo hasta la construcción, gracias a todo lo cual pudo lograr una gran producción cuantitativa y cualitativamente. Se concentró en lo esencial, que era la solución estructural, pero no como un ingeniero calculista sino en una forma *sui generis* de hacer arquitectura con la estructura, lográndolo desde luego en mayor grado en algunas de estas obras que son las que lo hicieron célebre pero sin dejar ninguna que demeritara su producción.

Aportaciones

Las aportaciones de Candela en el campo de la arquitectura destacaron a nivel mundial por la calidad de las obras realizadas, fundamentalmente las cubiertas en las que aplicó todos sus conocimientos a partir de una gran claridad conceptual, la máxima economía de material y de mano de obra, en contraste con un gran esfuerzo de análisis y diseño. El segundo concepto, no tan explícito como el primero en el que tanto insistió, era la forma estructural, expresión lo más pura posible de sus cualidades tectónicas, despojada al máximo de elementos adicionales. La contribución abarcó desde el análisis y la investigación básica, incluidas las hipótesis de cálculo, las fórmulas aplicadas a los cascarones de concreto armado, sobre todo los paraboloides parabólicos, hasta la construcción y los procedimientos de construcción. Sintetizado todo en nuevas formas estructurales que constituyen una totalidad. Como expresión arquitectónica destacaron más allá del uso del espacio, como sucedió con los paraguas; no sólo cubrieron grandes áreas de producción industrial, además dignificaron el espacio, sublimadas en la cubierta de la iglesia de la Medalla Milagrosa, al igual que las bóvedas de arista resueltas con *hypars* como la planta de la Bacardí, donde se alcanzaron en concreto armado claros de 30x30 metros, considerados por Candela el límite de estas estructuras. La propuesta de mayor magnitud fue el Palacio de los Deportes para las olimpiadas de 1968 y significó una aportación fundamental en el campo de las estructuras y de la arquitectura.

Las estructuras lograron su esbeltez y resistencia gracias al rigor con que Candela encontró la solución a través de la forma y su razón geométrica. Por eso su expresión plástica fue más afortunada cuando se lograba librarla de los elementos no estructurales, incluidos los cerramientos, aunque fueran pantallas transparentes de ventanal, o cuando pudo atenuarlos, por ejemplo prolongando los volados, o cuando quedaron libres. Se pueden mencionar como representativos de estas cualidades los siguientes: el pabellón de Rayos Cósmicos, el quiosco de Noruega, la iglesia de Palmira y el Palacio de los Deportes.

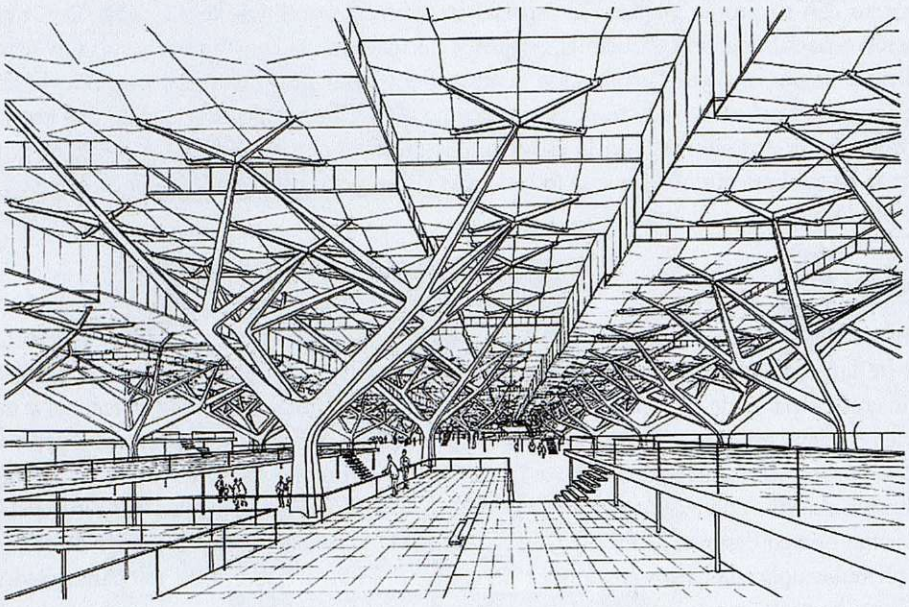
El móvil de Candela, y su búsqueda, fue fundamentalmente en el campo de las estructuras. Pero sin embargo sus inquietudes y preocupaciones fueron profundamente humanas y de horizonte amplio: desde la habitabilidad de esas estructuras, pasando por las ciudades, hasta el planeta en su conjunto. Es importante su artículo reviviendo las consideraciones de Malthus y Darwin sobre el crecimiento demográfico, haciendo una serie consideraciones. A pesar de lo peligroso de las tendencias al respecto del momento en que escribió, podemos apreciar como importantes sus observaciones y los datos en que los apoyó al paso del tiempo.

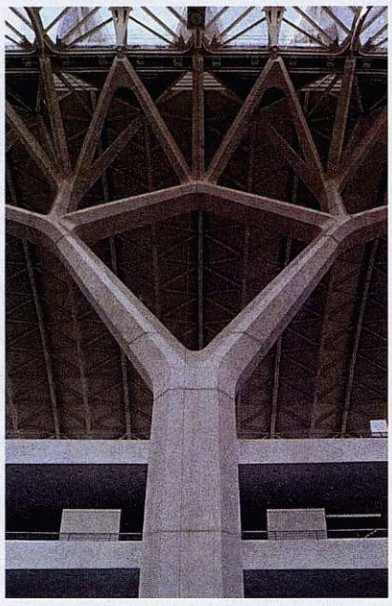
Recuerdo también sus preocupaciones sobre los límites, no sólo de las estructuras sino también sobre la idea del progreso al infinito. Como era el caso de los aviones sobre los que pronosticó habían llegado en los 70 a su límite de crecimiento en capacidad y sobre todo en velocidad. Insistía para qué tanta prisa en aire si el cuello de botella está en los aeropuertos. Ahora vemos que a nivel mundial se confirman: el problema está más en los aeropuertos que en los aviones, ya que incluso casi se agotó el espacio aéreo para la ubicación de aeropuertos que sirvan a las principales ciudades.

Proceso

Según Candela la creatividad consistía en romper prejuicios y esto se podía lograr por medio de dos caminos distintos. Primero, el conocimiento tan profundo de un tema que se pueda distinguir lo trascendente de lo contingente. Segundo, el de ignorar tanto del tema que se esté libre de prejuicios para proponer libre de éstos Desde luego el segundo caso es un escalón superior, viable sólo después de haber agotado el primero en muchos ejercicios. En muchos casos se puede presentar un problema derivado de la excesiva dedicación a la solución de una estruc-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO





(F. 12)

Félix Candela, proyecto de sala de exposiciones del Palacio de los Deportes de México, 1968. Vocabulario basado en formas tectónicas con diagonales

(F. 13)

Obra de Santiago Calatrava conformada por diagonales. Candela dejó una huella profunda en el vocabulario arquitectónico con su aportación a las estructuras del siglo XX

tura o una innovación. Es el bloqueo mental; al respecto también opinaba que después de alimentar la intuición con variedad de conocimientos había que dejar que el inconsciente hiciera la síntesis y el salto a la resolución innovadora.

La escala

La escala era una preocupación fundamental de Candela para lograr la máxima eficiencia en el trabajo estructural de las construcciones con base en la utilización de formas estructurales lógicas y pertinentes. Una expresión que expuso en varias ocasiones era que "En un mundo finito no se podía crecer impunemente" en condiciones optimas de trabajo. Lo pudo aplicar a las cubiertas utilizando cascarones de concreto armado hasta cierta escala. Cuando propuso la cubierta del Palacio de los Deportes sorprendió a todo mundo porque su propuesta fundamental ya no era un cascarón de concreto, que por cierto si propusieron varios concursantes. Esto obedecía a la clara conciencia que tenía de los límites de los cascarones, que se volvieron elementos secundarios pero en materiales más ligeros.

Las estructuras son producto de la forma en que se distribuyen y resisten las fuerzas de gravedad, en lo que juega un papel fundamentalmente la escala y la forma, que se modifica de acuerdo a ésta, como lo demuestran los cuerpos celestes, que a mayor masa mayor regularidad cercana a una esfera. La forma de un cuadrúpedo crece su masa al cubo pero su resistencia al cuadrado. Por eso las extremidades de un venado son tan delgadas que no puede nadar, pero sí puede saltar elegantemente. En cambio un elefante aumenta la sección de sus extremidades para soportarse perdiendo gracia para moverse y desde luego no lo podemos imaginar saltando obstáculos.

Por eso Candela decía que invertía mucho tiempo convenciendo a los clientes de los cascarones gigantes que le solicitaban con frecuencia. Fue el caso que presencié de una arquitecta que le pidió un paraguas muy grande para hacer en Acapulco: finalmente le dijo que era posible, pero modificando la geometría típica de esos elementos formados por cuatro *hypars* de planta rectangular, para solucionarlo con sistema de más *hypars* con base triangular como los que utilizó en la estación Candelaria del Metro. Así aumentaba el peralte casi al doble, por lo tanto el momento resistente de la ménsula, sin incrementar demasiado el peso.

Herencia

La obra y la trayectoria de Candela son de una gran riqueza, y con un potencial que requiere un esfuerzo de análisis muy grande para poderlo aprovechar, ya que el no siguió una ruta ordinaria. Su herencia tampoco está disponible por vía del sincretismo. Lo esencial en su obra son sus fundamentos teóricos, que aportaron una riqueza conceptual de gran claridad, y sus méto-

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

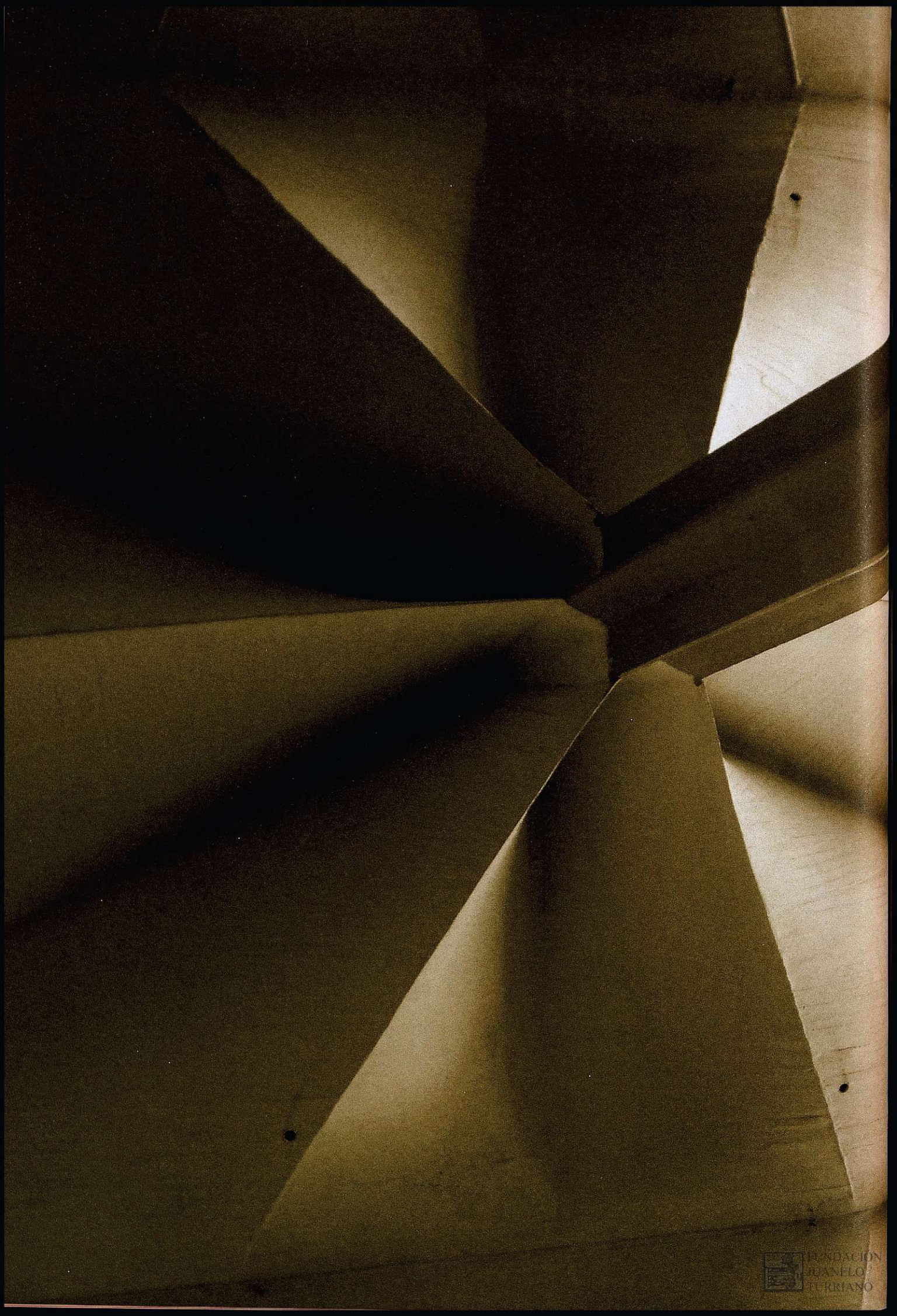
dos de análisis, de proyecto y de trabajo con la alta calidad y fuerte expresión de su propio vocabulario, gracias al dominio que logró de los distintos lenguajes. Resultan referencias importantes para asimilar un vocabulario arquitectónico de gran potencial como solución estructural. Si una generación inmediata poco aprovechó de esta herencia, es posible que un cambio de época y una revalorización de los conceptos en los que basó su trabajo, como la búsqueda de la máxima economía en las cubiertas, vuelva a ser relevante la búsqueda de soluciones con el mínimo de materia y máximo de análisis y diseño.

El Palacio de los Deportes es una obra extraordinaria que se puede considerar como obra maestra, y sin embargo fue poco comprendida, en parte por las condiciones políticas por las que atravesó el país en 1968, año en que se inauguró a la obra, por cierto con toda puntualidad, a pesar de ser la de mayor magnitud de las instalaciones olímpicas e incluso el claro más grande en el mundo cubierto con ese tipo de estructura, y en un país pobre con fama de desorganizado. La calidad del proyecto permitió su realización bien a tiempo, dentro de presupuesto, y además superando paradigmas sobre las estructuras, con una superficie de 20.000 m^2 que la colocó como la más grande en toda su trayectoria y como culminación de su evolución. Explorando la adecuación de las formas a la escala, descartó, ante el desconcierto general, los cascarones y utilizó los mantos de paraboloide como elemento secundario en cuanto al claro que cubrían, pero principal en torno al bajo peso del conjunto.

La forma de estructurarlo, superando la contradicción de las bóvedas clásicas utilizadas hasta ese momento, que al apoyarse en nervios radiados se concentran en donde menos se necesitan, que es al centro de la bóveda, y se dispersan en el borde exterior, que es donde se necesitan, fue lograr un equilibrio de elementos con una distribución equilibrada de esfuerzos entre el centro y bordes exteriores, y finalmente lograr la magistral combinación de las formas arquitectónicas básicas. La principal, de tipo estereotómica, formando un casquete esférico de gran legibilidad y facilidad de fabricación, con segmentos de arcos máximos. Resiste los posibles momentos en los arcos gracias a un peralte de cinco metros basado en diagonales y montantes de gran eficiencia estructural, que al mismo tiempo sirven de apoyo a los mantos secundarios de 12x12 metros aproximados, en una correspondencia espléndida que suma la fuerza expresiva de la forma estereotómica general y la tectónica de los secundarios mantos alabeados. Se integran y hacen una obra de gran unidad estructural y expresiva, siendo la cubierta la fundamental autoría arquitectónica y técnica, indiscutible, de Candela.

Un ejemplo del potencial en la herencia de Candela es la obra de Santiago Calatrava, que aprovecha en buena medida su vocabulario, como se puede notar en los recursos formales de fuerte expresión tectónica en elementos en diagonal, para formar contrafuertes en el Palacio de los Deportes y sobre todo en los sistemas columnas con forma de árbol en el proyecto del salón de exposiciones. No en balde también él reúne en una sola persona la formación de ingeniero y de arquitecto. La obra y la huella de Candela pueden dejar una lección para las nuevas generaciones en cuanto a la atención que merecen las estructuras para la arquitectura, y en vez de ocultarlas integrarlas y aprovechar su expresión tectónica.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

ANEXOS
ANNEX

1. Selección de Publicaciones
Selected Publications

2. Selección de Obras
Selected Work

RESEÑA BIOGRÁFICA
BIOGRAPHICAL BRIEF

Estación de metro Candelaria
México D.F., 1968

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Selección de Publicaciones de Félix Candela
Selected Publications by Felix Candela

1950

"Cubierta prismática de hormigón armado en la Ciudad de México"
Revista Nacional de Arquitectura n. 99, Madrid, 3/1950

1951

"Las cubiertas laminares en la arquitectura industrial"
Espacios n. 7, México, 6/1951

"Simple Concrete Shell Structures"
Journal of the American Concrete Institute n. 48, EEUU, 12/1951

"Hacia una nueva filosofía de las estructuras"
Memoria presentada al Congreso Científico Mexicano, México, 1951
Students Publication of the School of Design, Raleigh NC, EEUU, 1955
Architectural Forum, EEUU, 1956
Baukunst und Werkform, Alemania, 1959

1952

Discusión acerca de la conferencia
"The Structural Behavior of Barrel Shell Roofs" de Alfred Parme
University of Texas, Texas, 3/1952

"Hacia una nueva filosofía de las estructuras"
Revista Ingeniería vol. XXV, n. 2, México, 7/1952

"Una pequeña demostración práctica de la validez de la teoría de la membrana en superficies alabeadas"
Revista Ingeniería vol. XXV, n. 4, México, 11/1952

1953

"Hangares de Concreto de 100m de claro en el aeropuerto de Marsella"
Espacios n. 16, México, 8/1953

"Estero-estructuras, conferencia en la Casa del Arquitecto"
Espacios n. 17, México, 12/1953

"Skew Shell Utilized in Unusual Roof"
Journal of the American Concrete Institute n. 49, EEUU, 3/1953

"La arquitectura y la industria"
Industriales, México, 4/1953

"Divagaciones estructurales en torno al estilo"
Espacios n. 15, México, 01-1953

1954

"Toward a New Philosophy of Structures"
Collage n. 3, Student Publication of the School of Design, Raleigh NC, 1/1954

"Stereo-structures"
Progressive Architecture n. 6, Nueva York, 6/1954

"Stereo-structures"
Kokusai-Kentiku n. 21, Japón, 11/1954

"Estero-estructuras, conferencia en la Casa del Arquitecto"
Construcción n. 63, Caracas, 7/1954

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

"The Shell as Space Encloser"
Proceedings, Conference on *Thin Concrete Shells,* MIT

"Warped Surfaces"
Proceedings, Conference on *Thin Concrete Shells,* MIT, 6/1954

"Divagaciones estructurales en torno al estilo"
Student Publication of the School of Design, Raleigh NC, EEUU

1955

"The Shell as Space Encloser"
Proceeding, Conference on *Thin Concrete Shells, Kokusai-Kentiku* n. 9, Japón, 9/1955

"The Shell as Space Encloser"
Arts & Architecture, California, 1/1955

"Structural Digression Around Style in Architecture"
Collage n. 5, Student Publication of the School of Design, Raleigh NC, EEUU, 1/1954

"Structural Applications of Hyperbolic Paraboloidical Shells"
Journal of the American Concrete Institute n. 51, EEUU, 1/1955

"This Shell Roofs for Large Buildings"
Consulting Engineer, Michigan, 5/1955

"Structural Design Analysis of Rio's Warehouse"
Progressive Architecture, Nueva York, 7/1955

"Il Guscio-Sinonimo delle delimitazione delle spazio"
Civiltà delle Machine n. 5, Roma, 9/1955

"Durmientes de hormigón pretensado"
La Construcción Moderna, México, 7/1955

"Thin Shell Roofs for Large Buildings" [Techos de cascarón delgado para grandes edificios]
Consulting Engineer, 5/1955

"Losas delgadas, diseño más económico"
Construcción n. 10, 10-1955, Seattle

"A New Way to Span Space"
Architectural Forum n. 5, Nueva York, 11/1955

"La Iglesia de la Virgen de los Milagros. Contestaciones a una encuesta sobre arquitectura"
Espacios n. 28, México, 11/1955

"Enrique de la Mora y Palomar. Iglesia de Nuestra Señora de la Soledad"
Informes de la Construcción n. 76, ITCC Eduardo Torroja, Madrid, 12/1955

"Estructuras laminares parabólico-hiperbólicas"
Informes de la Construcción n. 76, ITCC Eduardo Torroja, Madrid, 12/1955

1956

"Construction en voûtes minces, au Méxique"
Techniques et Architecture n. 4, París, 1/1956

"Toward a New Structure"
Architectural Forum, Nueva York, 2/1956

"Shell Concrete Construction in México"
Municipal Journal n. 3290, Londres, 3/1956

"Les voûtes minces à l'espace architectural"
L´Architecture d´Aujourd´hui n. 64, París, 03/1956

"En Bogotá"
El Arquitecto n. 19, Bogotá, Colombia, 4/1956

"Intuition and Synthesis"
Dimension n. 2, Student Publications College of Architecture and Design
University of Michigan, 2/1956

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

"En defensa del formalismo"
Arquitectos de México, México, 7/1956

"Dos nuevas iglesias en México"
La Casa del Arquitecto, México, 4/1956

"La Iglesia de la Virgen Milagrosa"
Las Españas, México, 7/1956

"La Iglesia de la Virgen Milagrosa"
Informes de la Construcción n. 80, Madrid, 12/1956

"Sala de fiestas Jacaranda"
Informes de la Construcción n. 80, Madrid, 12/1956

1957

"El problema de la expresión..."
Arquitectura México n. 57, México, 3/1957

"Shell Forms"
The University of Southern California, California, 05-1957

"Concrete Shell Forms"
Arts & Architecture n. 5, Los Ángeles, 5/1957

"Lezioni di modestia di Félix Candela"
L´Architettura n. 22, Venecia, 8/1957

"La Crisis del Estilo Internacional"
Arquitectura México n. 59, México, 9/1957

"Realización de arquitectura litúrgica en México"
Arquitectura México, México, 10/1957

"The Structures of Eduardo Torroja"
Progressive Architecture, EEUU, 1/1957

"Crisis en la Arquitectura"
Arquitectura México n. 13, México, 12/1957

"Hyperbolic Paraboloids"
Conferencia sobre Creative Trends in Structural Design, Chicago, 2/1957

1958

"Cascarones de Concreto"
Construcción n. 6, México, 3/1958

"Cascarones de hormigón armado"
Construcción n. 6, Nueva York, 6/1958

"Understanding the Hyperbolic Paraboloid"
Architectual Record n. 7, Nueva York, 7/1958

"Stress Analysis for Any Hyperbolic Paraboloid"
Architectural Record, Nueva York, 8/1958

1959

"Cascarones de Concreto Armado"
Planificación Espacios, México, 1/1959

"Concrete"
Jubileumneumrrier Cement n. 1, Ámsterdam, 2/1959

"Félix Candela"
Arquitectura n. 10, Madrid, 10/1959

"Cascarones de Hormigón Armado"
Noticiero sima Gosstahl n. 3, Ámsterdam 4/1959

"Wegzu einer neuen Strukturauffassung"
Baunkunst und Werkform n. 8, Alemania, 8/1959

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

"Calculated Chance"
Interbuild n. 5, Londres, 5/1959

"Les Paraboloïdes Hyperboliques et les coques en béton armé"
Aujourd'hui, Art et Architecture n. 23, París, 1/1959

"Strutture e Strutturalismo Una lettera di Félix Candela"
Casabella n. 232, Milán, 10/1959

1960

"Planta Embotelladora Bacardí"
Ena n. 6, México, 3/1960

"Fórmulas generales para el cálculo de esfuerzos en cascarones paraboloides-hiperbólicos"
Ingeniería n. 2, México, 04-1960

"General Formulas for Membrane Stresses in Hyperbolic Paraboloidical Shells"
Journal of the American Concrete Institute n. 57, 10/1960

"Reinforced Concrete Shells"
Collage n. 2, Student Publication of the School of Design, Raleigh NC, EEUU, 1/1960

1961

"Planta Embotelladora Bacardí en México"
Nuestra Arquitectura n. 376, Buenos Aires, 3/1961

"La influencia del concreto armado y del progreso técnico y científico en la arquitectura de hoy y mañana"
Ena n. 3, México, 6/1961

"Aclaraciones del arquitecto Félix Candela"
Mañana n. 931, México, 7/1961

"Comentarios acerca de la colaboración entre arquitectos e ingenieros"
Ensayo leído en la VI Conferencia Internacional de Estudiantes de Arquitectura, México, 10/1961

"Toward a New Philosophy of Structure"
Cuadernos de Arquitectura n. 2, México, 7/1961

"Design and Construction in Mexico. Shell Construction"
Industrial Building n. 2, Nueva York, 10/1961

1962

"Une seule conscience pour l'oeuvre a créer"
L'Architecture d´Aujourd´hui n. 99, París, 12/1962

1963

"The Hyperbolic Paraboloid"
En Colin Faber, *Felix Candela: The Shell Builder,* Nueva York, 1963

"Arquitectura y Estructuralismo"
Ponencia solicitada para el Congreso de la Unión Internacional de Arquitectos, México
Arquitectura n. 59, Madrid, 11/1963

1964

"Arquitectura y Estructuralismo"
Arquitectos de México n. 21, Madrid, 1/1964

"La obra de Pier Luigi Nervi"
Instituto Nacional de Bellas Artes

1965

"Arquitectura y Estructuralismo"
Summa n. 4, Buenos Aires, 12/1965

"Architettura e Struttalismo"
Casabella n. 306, Milán, 1/1966

"Comprendere il paraboloide iperbolico"
Casabella n. 298, Milán, 10/1965

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

"Shell Structure Development"
The Canadian Architect n. 1, Ottawa, 01/1967

"This Ove Arup: Fetskrift for Ove Arup"
London Newsletter n. 32, Londres, 4/1965

"Prefacio para el libro de Frei Otto"
Frei Otto Spannweiten, Viena, 1/1965

1966

Conferencia
Arquitectura n. 93, México

"Architettura e structuralismo"
Casabella n. 306

1967

"El problema de la forma y de la escala y sus limitaciones"
Congreso Internacional sobre la aplicación de las estructuras laminares a la arquitectura, IASS, México

"Shell Structure Development"
Canadian Architect n. 12, 1/1967

"El escándalo de la Ópera de Sydney"
Arquitectura n. 98, México, 1/1967
Arquitectura n. 108, Madrid, 12/1967
En defensa del formalismo y otros escritos, Xarait ediciones, Madrid, 1985

1968

"La tragedia de los hombres de mi generación es que estamos ayudando a crear un mundo en el que no creemos"
Siempre n. 785, México, 7/1968
Encuesta de la revista *Arquitectura* de México, 1968
En defensa del formalismo y otros escritos, Xarait ediciones, Madrid, 1985

"XIX Olimpiada, México. Estadio Olímpico de la Ciudad de México"
Informes de la Construcción n. 2 05, ITCC Eduardo Torroja, Madrid, 11/1968

"Proyecto arquitectónico del Palacio de Deportes. Con E. Castañeda y Peyrí"
Ingeniería n. 38

1969

"Mis Obras"
Conferencia en el ITCC Eduardo Torroja, Madrid, 22 de octubre de 1969

"Proyecto de Centro de Deportes en Kuwait"
Arquitectura n. 132, Madrid, 12/1969

1970

"La Crisis Ecológica Mundial"
Arquitectura n. 142, 10/1970

"Folded Hypar Shells"
American Concrete Institute, 4/1970

1971

"La Crisis Ecológica Mundial"
Devenir, Cuadernos del Seminario de Historia n. 2, UNAM México, 3/1971

"La Explosión demográfica"
Devenir, Cuadernos del Seminario de Historia n. 3, UNAM México, 3/1971

"La Explosión demográfica"
Arquitectura n. 145, 1/1971

1972

"The Heritage of Maillart"
Civil Engineering, History, Heritage and the Humanities, Princeton, 10/1972

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

"Emilio Pérez Piñeiro (1936-1972)"
Arquitectura n. 163-164, Madrid

1973

"Small Shells for Large Roofs"
Zodiac n. 22, Milán, 1/1973

1975

"Influencia de la tecnología en la Creatividad Arquitectónica"
Memoria del XII Congreso de la UIA, Madrid, 8/1975

1979

"Notes for History, the Development of Thin Concrete Shells in Mexico", IASS, Madrid

1985

En defensa del formalismo y otros escritos
Xarait Ediciones, Bilbao, 1985

1991

"Calatrave´s Graceful Shapes"
World Architecture n. 13

1995

"Influencia de la tecnología en la creatividad arquitectónica"
Arquitectura n. 303, Madrid

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Selección de Publicaciones sobre Félix Candela
Selected Publications about Felix Candela

1951

Robira R.: "La Iglesia", *Arquitectura* n. 36, México, 12/1951

1952

"The New University City of México/ The Pavillion of Cosmic Rays of the Institute of Nuclear Physic", Arts and Architecture n. 69, México

"México", *Architectural Forum* n. 97

1953

Mendelsohn E.: "Back ground to Design", Architectural Forum, Nueva York, 04/1953

Banham R.: "Simplified Vaulting Practice", *Architectural Review*, Londres, 9/1953

McCoy E.: "The New University of Mexico", *Arts & Architecture* vol. 70, n. 9, Los Ángeles, 09/1953

Nelken M.: "Inquietudes de la Arquitectura de Hoy", *Excelsior* n. 9-C, México, 9/1953

Neugab F.: "Die neue Universitats Stadt von Mexico", Die Kunst, 12 -09- 1953

Postigo A.: "Un arquitecto español construye un atrevido pabellón para alojar un equipo inatómico de resultados asombrosos", *El Pueblo Gallego*, España, 21-11-1953

1954

Faber C.: *Felix Candela's Live Concrete*, Mexico This Month, Mexico D.F., 1954

"Shells in Mexico", (El Concreto vivo de Félix Candela), *Architectural Forum*, Nueva York, 8/1954

1955

"Shells in Mexico", International Association for Bridge and Structural Engineering, *Bulletin* n. 14

"Umbrella", Civil Engineering n. 25

Cosco G.: "La obra arquitectónica de Félix Candela", *Arquitectura*, México D.F., 12/1955

"The Work of Felix Candela", *Progressive Architecture*, Nueva York, 7/1955

"Una Chiesa al Messico" (Una Iglesia en México), *Domus*, Milán, 7/1955

Ketchum M. y Stetson J.O.: "Genius Miraculous", *Progressive Architecture* vol. 36, n. 9, Nueva York, 9/1955

"Techos y Cimientos de Cáscaras de Hormigón", Ingeniería Internacional de Construcción, Nueva York, 8/1955, 10/1955

"Estructuras Laminares Parabólico Hiperbólicas/Structural Aplications of Hyperbolic Paraboloidical Shells", *Informes de la Construcción* n. 76, ITCC, 12/1955

"Iglesia de Nuestra Señora de la Soledad. Credo Profesional", Informes de la Construcción n. 76, ITCC, 12/1955

1956

"Felix Candela as a Contemporary", *Arts & Architecture* vol. 73, n. 5, Los Ángeles, 3/1956

"Construction en Voiles Minces au Mexique" (Construcción de bóvedas delgadas en México), *Techniques et Architecture* 15a, Serie n. 4 (Betón Armé n. 1), París, 1/1956

"Shell Concrete Construction un Mexico" (Construcción de Cascarones de Concreto en México), *The Municipal Journal*, Londres, 3/1956

Graham G.: "An Architect Visits Brazil, Venezuela and Mexico" (Un arquitecto visita Brasil, Venezuela y México), *Architectural Association Journal*, Londres, 3/1956

"Chapelle Notre-Dame de la Solitude, Coyoacán, San José del Altillo, México", *L'Architecture d´aujourd'hui*, 27, n. 64, 3/1956

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

"Sala de Fiestas Jacaranda/Jacaranda Night-Club", *Informes de la Construcción* n. 80, ITCC, 4/1956

"Félix Candela", *Proa* n. 99, Bogotá, 5/1956

FABER C: "Structure by Felix Candela", *Arts and Architecture* n. 75, 5/1956

"Breve Documentario di Félix Candela", *Domus* n. 319, Milán, 6/1956

"Gittate di Luce e di Cimento" (Obras de luz y cemento), *L'Architettura* n. 8, Roma, 6/1956

"Una Iglesia por Félix Candela", *Arquitecto peruano* n. 226-227

"A New Church Shape" (Una nueva forma de Iglesia), *Life*, Nueva York, 6/1956 (*Life* en español, 7/1956)

"Double-Curved Thin Shell Concrete Slab for Chapel" (Losa de concreto en cascarón delgado en doble curvatura para una capilla), *Progressive Architecture*, Nueva York, 10/1956

"La Iglesia de la Virgen de la Milagrosa/Church of the Miraculous Virgin", *Informes de la Construcción* n. 86, ITCC, 12/1956

1957

FABER C.: "Félix Candela, como contemporáneo", *Construcción Moderna* 11, n. 83

BOWMAN W.: "Umbrellas over Mexico City's New Buildings", *Engineering News Record*, Nueva York, 5/1957

MCCOY E.: *Felix Candela: Shell Forms*, University of Southern California, 5/1957

MCCOY E.: "Mexico's Shell Builder/Félix Candela", *New Mexico Quarterly* n. 27

CAMPBELL B.: "Felix Candela", *Concrete Quartely* n. 33, 6/1957

GRAHAM G.: "Felix Candela and the Hyperbolic Paraboloid", *Architecture and Building*, Londres, 1957

"Concrete Shell Forms. Felix Candela", *Arts & Architecture*, Los Ángeles, 5/1957

NICOLETTI M.: "Profilo di un architetto americano. Félix Candela", *L'Architettura* n. 16, Milán, 2/1957

"Incontro con Félix Candela", *L'Architettura* n. 1 6, Milán, 2/1957

"Paraboloidi iperbolici e volte sottili in México" (Paraboloides hiperbólicos y bóvedas en México), *L'Architettura* n. 19, Roma, 3/1957

"Construcción aplaude al Arquitecto Félix Candela", *Ingeniería Internacional Construcción*, 04/ 1957

"Félix Candela", *Aujourd'hui. Art et Architecture* n. 3, 6/1957

"Lezioni di Modesti di Felix Candela", *L´Architettura* n. 22, Roma, 8/1957

"Lederle Laboratorios, México D.F.", *Progressive Architecture*, Nueva York, 9/1957

1958

BOYD R.: "Engineering of Excitement", *Architectural Review* vol. CXXIV, n. 742, Londres, 11/1958

DE MÁRQUES R.: "La moderna arquitectura religiosa", *Nosotros* n. 593, México D.F., 10/1958

"Felix Candela: Architect of Shells", *Time*, Nueva York, 08-09-1958

"Ein Neugeknüpfter Faden der Architektonischen Entwicklung" (Un nuevo puntal del desarrollo arquitectónico), *Baukunst und Werkform* n. 8, Nuremberg, 1958

"Teknisk Byggekunst idet 20 Ärhundrede" (Arte constructivo técnico del siglo 20), *Arkitekten* n. 26, 12/1958

1959

AA VV: *Felix Candela*, 1959

BASTIEN L.: "Our Lady of Solitud Chapel in México", *Liturgical Arts 3* vol.27, n. 3, 5/1959

CAMPBELL B.: "Felix Candela", *Concrete Quartely* n. 42, 1959

CREIGHTON T.H.: "The New Sensualism II", *Progressive Architecture* vol. 15, n. 10, Nueva York, 10/1959

HOLMES B. y CREIGHTON T.: "Recent Work of México´s Felix Candela. Can a man be architect, engineer and builder?", *Progressive Architecture*, Nueva York, 2/1959

"Felix Candela. Shells in Architecture", Evergreen Review vol. 2, n. 7, Nueva York, 1959

"Felix Candela and Shells in Architecture", *Intercambio*, n. 187, México D.F., 6/1959

"Ein Neue Schalen Konstruktion in Mexico" (Una nueva construcción de cascarones en México), *Bauwelt* n. 12, Berlín, 1/1959

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

"El Arquitecto Félix Candela", *Viajes* n. 41, México D.F., primavera 1959

"Interview with Felix Candela", *Interbuild* vol. 6, n. 5, Londres, 5/1959

"Recent Work of Mexico´s Félix Candela", *Progressive Architecture* vol. 40, n. 2, 2/1959

MOFFETT N.: "Candela against His Background", *Architecture and Building*, 9/1959

"Neuere Schalenbauten von Felix Candela" (Nuevas construcciones de cascarones de Félix Candela), *Bauwelt* n. 42, Berlín, 10/1959

Félix Candela (artículos de Pascual Bravo Sanfeliú, José A. Corrales y Ramón Vázquez Molezún, Miguel Fisac, Luis Moya, Fernando Chueca Goitia, Rafael Fernández Huidobro, Antonio Vallejo y Fernando R. de Dampierre, Javier Lahuerta, Francisco Cabrero, Fernando Higueras y Francisco de Inza), *Arquitectura* n. 10, Madrid, 10/1959

"Wizard of the Shells" (El mago de los cascarones), *Architectural Forum*, Nueva York, 11/1959

MCCOY E.: Felix Candela: Shells in Architecture (Félix Candela. Los cascarones en la Arquitectura), *Evergreen review* vol. 2, n. 7, Nueva York, invierno 1959

1960

CAMPBELL B.: "Felix Candela", *Cement* n. 8, Ámsterdam, 1960

KULTERMANN U.: *Baukunst der Gegenwart* (La presencia de la Arquitectura), Ernst Wasmuth, Tubinga, 1960

MARUXA: "Charlas con el Arquitecto Candela: Humanismo y Arquitectura", *Revista de la Cruz Roja Mexicana* 25, vol. 2, n. 25, México D.F., 4/1960

O´DONNELL R.: *Chapels for Tomorrow* (Introduction), EEUU, 1960

SARTORIS A.: "El premio Perret y la Medalla de Oro para Félix Candela", *Architecture, Forms and functions*, Lausana, 1960

"Neue Bauten von Felix Candela" (Nuevas construcciones de Félix Candela), *Baukunst und Werkbund* n. 1, Nuremberg, 1/1960

"Planta Embotelladora Bacardí", ENA n. 6, México, 3/1960

"Spectacular Shapes of Concrete", *Life*, Nueva York, 4/1960 (*Life* en español, 5/1960)

La Paradoja de Félix Candela, *Visión*, Nueva York, 7/1960

SARTORIS, A.: "Félix Candela: architecte, ingénieur et constructeur", *Architecture Forms and Functions*, Lausana, 1960

IBBETSON M.B.:"Felix Candela", *Accent* n. 2

SIEGEL C.: *Strukturformen der Modernen Architektur* (Formas estructurales de la nueva arquitectura), D.W. Callway, Munich, 1960

"Tres fábricas de Félix Candela", *Calli* n. 2, México D.F., 9/1960

"Enrique de la Mora y Palomar, Félix Candela (deux églises au Mexique)", *L'Architecture d'Aujourd'hui*, París, 9/1960

"Felix Candela, Mexican Architect and Engineer", *Architect and Builder*, 10/1960

"El paraboloide hiperbólico y sus aplicaciones", *Arquitectura de Cuba n. 327, La Habana, invierno 1960*

1961

BUSCHIAZZO F.: *Félix Candela*, Buenos Aires, 12/1961

CETTO M.: *Modern Architecture in México*, Praeger, Nueva York, 1961

KASPE V.: "Architecture du Mexique", *Nouvelles du Mexique* n. 25, París, 6/1961

LEAL CORTES A.: "Félix Candela. Premio Internacional de Arquitectura", *Mañana* n. 9, 30, México D.F., 6/1961

NICHOLSON I.: "Félix Candela y la arquitectura mejicana", *Intercambio* n. 212, México, 31-07-1961

PINONCELLY S.: "La obra de Félix Candela", *Cuadernos de Bellas Artes* n. 2, México D.F., 7/1961

PONIATOWSKA E.: "Candela: el salto mortal de la arquitectura", *México en la cultura*, México D.F., 5/1961

RAMÍREZ DAMPIERRE F.: "Temas del momento. Félix Candela", *Arquitectura* n. 30, año III, Madrid, 6/1961

URRUTIA O.: "Una aportación definitiva a la técnica del concreto. Calli entrevista a Candela", *Calli* n. 5, México D.F., 10/1961

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

"Encuentro con Félix Candela", *Nuestra Arquitectura* n. 526, México D.F., 3/1961

"Toits mexicains dits Voiles Minces" (Techos mexicanos llamados cascarones), *Nouvelles du Mexique* n. 25, México D.F.

"Estadio de Foot-Ball en Tlalpam D.F.", *ENA* n. 3, 6/1961

ANGERER F.: *Bauen mit Tragenden den Flachen* (Construcciones con losas portantes), D.W. Callwey, Munich, 1961

"Premio Internacional de Arquitectura de Félix Candela", *Cuadernos de Bellas Artes* n. 6, México D.F., 6/1961

"Félix Candela, architecte du movement", *Le Monde*, París, 1961

"Four Great Pours: Candela" (Cuatro grandes colados: Candela), *Architectural Forum*, Nueva York, 9/1961

"Kirche San José Obrero in Monterrey. Garten restaurant in Xochimilco" (Iglesia de San José Obrero en Monterrey. Jardín Restarurante en Xochimilco), *Bauen Wohenen* n. 11, Zúrich, 11/ 1961

SÁNCHEZ ARCAS M.: *Form und Bauweise der Schalen* (Forma y método de construcción de los cascarones), Deutsche Bauakadaemie, Berlín Oriental, 1961

FLORES C.: *Arquitectura Española Contemporánea*, Aguilar, Madrid, 1961

1962

CAMPBELL B.: "Felix Candela", *The Guild Engineer* n. 13, Londres, 1962

CHRIST-JANER A. y MIX FOLEY M.: *Modern Church Architecture*, Dodge Book, McGraw-Hill, Universidad de Michigan, 1962

"Félix Candela: Trois realisations récents", *L´Architecture d´Aujourd´hui* n. 99, París, 1/1962

"Bacardí", *Life* 19, n. 4, 3/1962

"México: País Modelo. Los Arquitectos", *Noticiero Sima* n. 2, vol. 8, Buenos Aires, 3/1962

"Nuevas Tendencias en la arquitectura religiosa mexicana", *Construcción Moderna* n. 144, vol. XII, México D.F., 5/1962.

"Soccer Stadium for 110 000" (Estadio de fútbol para 110.000 espectadores), *Progressive Architecture*, Nueva York, 7/1962

"Mexican Stadium", *Architectural Review* 132, n. 789, 11/1962

1963

FABER C.: *Candela: The Shell Builder*, Reinhold, NuevaYork, 1963

"Mexico Revisited: The Presence of Candela", *Zodiac*, Italia, 10/1963

Sharp D.: *The Modern Movement in Architecture. A Bibliographical Bibliography*, Londres, 12-1963.

"The Prisoner of Geometry", *Time* 81, n. 27, 6/1963

"Medieval Forms Transformed", *Progressive Architecture* 44, n. 11, 11/1963

1964

ARUP O.: "Su Félix Candela", *Domus* n. 410, 1/1964

BOYARSKY A.: "Felix Candela at A.A.", *Architectural Association Journal* 883, vol. 80, n. 883. Londres, 1964

CJLUSKER P.: "The Arts", *Mexico This Month* vol. X, n. 10, México D.F., 1/1964

MORRISON K.: "Art and Architecture for Today´s Church", *Protestant church Building and Equipment* vol. 12, n. 1, Nueva York, 4/1964

FABER C.: "Candela: The Shell Builder", *RIBA Journal*, Londres, 7/1964

FABER C.: "Candela: The Shell Builder", *Architectual Design*, Londres, 8/1964

BORCHERDT H.: *Frei Former, hebunden durch Einkeint der form*, Alemania, 1964

BORCHERDT H.: *Candela und seine Schalen*, Alemania, 1964

JOYSMITH T.: "Candela of Shell Design Fame", *News*, 12-01-1964

SUGDEN D.: "Candela: Shell Builder", *Architectural Association Journal* 80, n. 887

KESTOFF S.: "Les engineeires et l'architecture (Candela)", *L'Architecture d'Aujourd'hui* n. 113-114, París, 12/1964

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

KATZMAN I.: *La arquitectura Contemporánea Mexicana. La arquitectura contemporánea mexicana*, Instituto Nacional de Antropología e Historia, 1964

1965

BEEKKE R.: "Candelaskallet-Anvendt Matematikk i Byggekunsten", *Betongen Idog* n. 3, Oslo, 11/1965

CASSINELLO F.: *Apuntes de la asignatura Construcción: Hormigón*, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid, 1965

CETTO M.: *Candela und Seine Schalen*, Múnich, 1965

CORGAN J.: *Felix Candela*, Term Paper, Stillwater, Oklahoma, 1965

"Shell Structures", *Journal of the American Concrete Institute* n. 62

1966

CASTRO ARINES J.: "Arquitectura actual de América", Construcción Vidrio Cerámica, año XXV, Madrid, 1/1966

DE INZA F.: "Comentarios a una conferencia de Félix Candela", *Arquitectura* n. 88, Madrid, 4/1966

"Church of Nuestra Señora de Guadalupe. Madrid, Spain. Arquitectos: E. de la Mora y J.R. Azpiazu, Ingeniero: J.A. Torroja"

1967

BORGES M.: "Cabaret Tropicana", Instituto Nacional de Bellas Artes, Exposición Arquitectura Panamericana, México D.F., 7/1967

MACIEL B.: "Nuestras nuevas bodegas de embace orizaba", *Panorama Moctezuma* vol. X, n. 113, México D.F., 7/1967

SMITH C.: "Builder in the Sun: Five Mexican Architects", *Progressive Architecture* n. 8, Nueva York, 8/1967

1968

DONOSO PAREJA, M.: *Félix Candela: la funcionalidad arquitectónica*, Novedades, México, 1968

KOCH R.: "El Instituto de Ingeniería", El Día, México D.F., 6/1968

OBREGÓN E.: "El mundo de los Timbres", *Novedades*, México D.F., 7/1968

"Buildings for the 1968 Olympic Games. Mexico City", *Deutsche Bauzeitung* n. 7, 1968

MESTRE H., O´GORMAN J. y MIJARES R.: "1938-1968, treinta años de Arquitectura", *Arquitectura México* n. 100, 1968

"Félix Candela", *Architectural and Engineering News* n. 10, 1968

KENT V.: *Ibérica por la libertad* n. 13-16, 1965-1968

1969

CALATRAVA VALLS S.: "Museo de Ciencias. Centro y foro internacional de las ciencias", *Informes de la Construcción* n. 469-470, ITCC Madrid, 10/1969

CASSINELLO F.: "Resumen de la Conferencia de Félix Candela 'Mis Obras', pronunciada en el ITCC", 22-10-1969

"Sports Hall, Mexico City. Architects: F. Candela, F. Castañeda, A. Peyrí", *Techniques and Architecture* 30, n. 5, 1969

1970

ECHEGARAY M.: *Las estructuras de Candela*, México D.F., 1970

STIRLING J.F.: A view of Contemporary World Architecture. Japan Architect 45

"Félix Candela und seine Schalen", *Mümster* 23, n. 4

"Kuwait Sports Center", *Architectural Design* 40, n. 3

1972

TONDA J.A.: *Paraboloides hiperbólicos*, Editorial Limusa-Wiley, 1972

1973

TONDA J.A.: "Bóvedas de cascarón para la planta de Bacardí en México", *IMCYC 10*, n. 60, 1/1973

"Recent Works by Félix Candela", *Zodiac* n. 22, 1973

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

1975

Cassinello F.: *Construcción. Hormigonería*, Editorial Rueda (libro de texto Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica), Madrid, 1975 (re-edición Reverté-Instituto Juan de Herrera, ETSAM, 1996)

1976

Canals Navarrete I.: *Cascarones Parabólico-Hiperbólicos*, Editorial Limusa, 1976

1980

Winter J.: *Felix Candela*. In Contemporary Architects, M. Emmanuel, New York, 1980

1981

Castedo L.: "Forma, arte y función en la arquitectura e ingeniería de Félix Candela", *AUCA Arquitectura, urbanismo, construcción, arte* n. 43, 1981

1985

Billington D.P.: "Felix Candela and Structural Art", *Bulletin of the Internacional Association for Shell Structures IASS*, 26-2, n. 88, 1985

1988

Sijpkes P.: "Form Follows Formwork: The Architecture of Félix Candela", *ARQ: Architecture-Québec* n. 44, 1988

1989

Giral Á.: "La arquitectura de Félix Candela", en Sánchez-Albornoz N. (ed.), *El destierro español en América. Un trasvase cultural*, Instituto de Cooperación Iberoamericana, 1989

Abellán J.L.: *El pensamiento español contemporáneo y la idea de América*, Editorial Anthropos, 1989

1990

López Polanco R.: "Acto solemne de investidura como Doctor Honoris Causa de Félix Candela Outeriño", Universidad de Sevilla, 1990

1991

Mereles L.M.: "A Master Builder in México", *World Architecture* n. 13

1992

Polonyi S.: *Zum Werk von Felix Candela: Die Kunst der leichten Schalen*, Cologne

Zorgno A.: "Les métaphors de béton armé", *Cahiers de la recherche architecturale* n. 29, 1992

Sharp D.: "Minimal Overheads", *Building Design*, 9/1992

1993

Noelle L.: *Arquitectos Contemporáneos de México*, Editorial Trillas, 1993

Krieger P.: *Arte y Ciencia: XXIV Coloquio Internacional de Historia del Arte*, Instituto de Investigaciones Estéticas UNAM, 1993

1994

Seguí Buenaventura M.: *Félix Candela arquitecto*, exposición en el Depósito Elevado del Canal de Isabel II (11 mayo-24 de junio 1994), Dirección General para la Vivienda-Canal Isabel II-Instituto Juan de Herrera, Madrid, 1994

Aroca Hernández-Ros, R.: "Solemne acto académico con motivo de la investidura de Doctor Honoris Causa del profesor Candela", Universidad politécnica de Madrid, 10-05-1994

1995

Girona i Albuixec A.: *El exilio valenciano en América, obra y memoria*, Universitat de València, 1995

Sainz J.: "Félix Candela zum 85. Geburtstag", *Bauwelt* 86, n. 4

1996

Anaya Duarte J.: *El Templo en la Teología y la Arquitectura*, Universidad Iberoamericana, 1996

González Gortázar F.: *La Arquitectura Mexicana del Siglo XX*, Consejo Nacional para la Cultura y la Artes, 1996

1997

De La Hoz R.: "Muere en EEUU a los 87 años Félix Candela, uno de los grandes mitos de la arquitectura española", *ABC*, 8-12-1997

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

1998

Bastera Otero L. A.: *Las estructuras arquitctónicas de Félix Candela*, etsa, Universidad de Valladolid, 1998

Calavera J.: "En recuerdo de Félix Candela", *Revista de Obras Públicas* n. 3377, 1998

Calavera J.: "En recuerdo de Félix Candela", *Ingeniería Estructural*, año 4, n. 14, 1998

1999

Domingo T.A.: "La Ciudad de las Artes y de las Ciencias de Valencia The expressive force of structures", *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 40, n. 131, 12/1999

Sanz Balduz L.J.: "El borde libre y Félix Candela", *Revista de Obras Públicas*, Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Madrid, 1999

2000

Tonda J.A.: *Félix Candela*, Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, Dirección General de Publicaciones, México d.f., 2000

Ivorra Miñana J.M.: *Estudio geométrico de las cubiertas laminares de Félix Candela generadas por paraboloides hiperbólicos*, Universidad de Alicante, 2000

2001

Basterra A.: "Felix Candela and the Free-edge. The Example of Cuernavaca´s Palmira Chapel", *Bitacora arquitectura* n. 5, 2001

De Anda Alanís E.: *La Arquitectura Mexicana del Siglo xx. Ciudad de México: Arquitectura 1921-1970* (catálogo de la exposición de México y Sevilla), Consejería de Obras Públicas y Transportes, Sevilla, 2001

2002

Izuel Martínez M.J.: *Análisis por elementos finitos de las estructuras laminares en forma de paraboloide hiperbólico del arquitecto Félix Candela (1910-1997)*, Universidad de Zaragoza, 2002

"Wasserwelten Aquatic Worlds", *md* 49, n. 8, 2002

2004

Billington D.P. y Garlock M.: "Thin Shell Concrete Structures. The Master Builders", *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 45, n. 3, 12/2004

Seguí Buenaventura M.: *Félix Candela y Emilio Pérez Piñeiro: Un diálogo imaginal, proyecto para el concurso del Velódromo de Anoeta 1972*, Rueda, 2004

Strike J. y Pérez Arroyo S.: *De la Construcción a los Proyectos. La influencia de las nuevas técnicas en el diseño arquitectónico, 1700-2000*, Reverté, 2004

Toca A.: *Arquitecturas finiseculares en México*, Universidad Iberoamericana de México, 2004 (actas del coloquio del 12 de mayo de 2000 en la Universidad Iberoamericana)

2006

Burger N. y Billington D.P.: "Felix Candela, Elegance, and Endurance. An Examination of the Xochimilco Shell", *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 47, n.3, 12/2004

2008

Cassinello P.: El espíritu impreso de una idea / The spirit of an idea in print (catálogo de la exposición conmemorativa de los 60 años de la revista *Informes de la Construcción*), Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja itcc-Consejo Superior de Investigaciones Científicas csic-amiet, Madrid, 2008

Draper P., Garlock M. y Billington D.P.: "Optimization of concrete hyperboloid umbrella shells", Proceeding of the 6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures, iass-iacm, Cornell University, Ithaca ny, 2008

Garlock M. y Billington D.P.: *Felix Candela: Engineer, Builder, Structural Artist*, Princeton University Art Museum-Yale University Press, 2008

AA VV: *Seven Structural Engineers. The Felix Candela Lectures*, Guy Nordenson (ed.), The Museum of Modern Art MoMA, Nueva York, 2008

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Selección de obras realizadas por Félix Candela
Selected Work by Felix Candela

1949

- Bóveda experimental en San Bartolo, México (catenaria)

1950

- Boliches Marsella en la Colonia Juárez, México D.F. (cilíndrica)
  Arquitectura: José Domingo Samperio
- Conoide Experimental para la Fábrica Fernández en San Bartolo, México (conoide)
- Fabrica Fernández en San Bartolo, México (conoides)
  Arquitectura: Raúl Fernández
- Bodega Pisa en San Bartolo, México D.F. (cilíndrica)
  Arquitectura: José Luis Certucha
- Club Junior en Escadon, México D.F.. (cilíndrica larga)
  Arquitectura: F. Fernández

1951

- Pabellón de los Rayos Cósmicos en la Universidad Nacional Autónoma de México, MéxicoD.F. (*hypar*)
  Arquitectura: Jorge González Reyna
- Escuela rural, cerca de Ciudad Victoria, en Tamaulipas, México. (funicular corrugado)
- Residencia Romero en los Jardines del Pedregal, México D.F. (sinusoidal)
  Arquitectura: Raúl Fernández
- Tienda de Flores en Las Lomas de Chapultepec, México D.F. (sinusoidal)
  Arquitectura: Eduardo Robles
- Casa del Novedades n. 1, en los Jardines del Pedregal. México D.F.. (cilíndrica)
  Arquitectura: Raúl Fernández
- Casa del Novedades n. 2, en los Jardines del Pedregal. México D.F. (plegada)
  Arquitectura: Raúl Fernández
- Casa del Novedades n. 3, en los Jardines del Pedregal. México D.F. (conoidal)
  Arquitectura: Raúl Fernández
- Almacén Madaria en Ciudad Victoria, Tamaulipas. México D.F.
  Arquitectura: Cayetano de la Jara

1952

- Paraguas Experimental en Tecamachalco, México D.F. (*hypar*)
- Auditorio de Facultad de Química en la Ciudad Universitaria de México D.F. (conos truncados)
  Arquitectura: Guillermo Rosell, Enrique Yañez y Enrique Guerrero
- Laboratorios CIBA en Churubusco, México D.F. (paraguas)
  Arquitectura: Alejandro Prieto
- Lechería CEIMSA en Tlalnepantla, México D.F.
  Arquitectura: Carlos Recamier

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

- Agencia Automotriz Nash en Anzures, México D.F. (plegada)
  Arquitectura: F. Fernández

- Residencia Almada en los Jardines del Pedregal, México D.F. (*hypar*)
  Arquitectura: Horacio Almada

- Almacén Las Aduanas, en Vallejo, México D.F. (cilíndrica)
  Arquitectura: Carlos Recamier

1953

- Escuela Hidalgo, Unidad Modelo, México D.F.
  Arquitectura: Luis Rivadeneyra

- Centro Gallego en México D.F. (cúpula elíptica)
  Arquitectura: José Caridad Mateo

- Paraguas experimental en Vallejo, México D.F. (*hypar*)

- Fabrica de Sedas Parisina en Xochimanca, México (*hypar*)
  Arquitectura: José Gorbea

- Iglesia de la Medalla de la Virgen Milagrosa, en Navarrete, México D.F. (paraguas)

- Almacén de Río en Lindavista, México D.F. (paraguas)

- Hilandería de Rivetex en Cuernavaca, Morelos, México (cilíndrica)

1954

- Fábrica de acabados finos en Puente de vigas, México (paraguas)
  Arquitectura: Leopoldo Domínguez

- Fábrica High Life en Coyoacán, México D.F. (paraguas)

- Cabaret Jacaranda en Juarez, México D.F. (cúpula semiesférica)
  Arquitectura: Max Borges Jr.

- Bodega Herdez en San Bartolo, México D.F. (paraboloide hiperbólico)

- Planta destiladora de Bacardí en La Galarza, Matamoros, Puebla, México (cilíndrica)
  Arquitectura: Héctor Mestre y Manuel de la Colina

- Fábrica de cemento La Tolteca en Vallejo, México D.F. (paraguas)

1955

- Fábrica textil en Santa Ana, Tlaxcala (paraguas)

- La Bolsa de Valores en la calle Uruguay, México D.F. (*hypar*/crucería)
  Arquitectura: Enrique de la Mora y Fernando López Carmona

- Laboratorios Lederle en la Calzada de Tlalpan Coapa, México D.F. (paraguas)
  Arquitectura: Alejandro Prieto

- Fábrica de Hilados de Lana en Santa Ana, Tlaxcala (paraguas)

- Fábrica textil La Fama en Tlalpam, México D.F. (cilíndricas)

- Mercado de Coyoacán en Coyoacán, México D.F. (paraguas)
  Arquitectura: Pedro Ramírez Vázquez

- Capilla de Nuestra Señora de la Soledad "el Altillo" en Coyoacán, México D.F. (paraboloide hiperbólico)
  Arquitectura: Enrique de la Mora y Fernando López Carmona

- Mercado Atzcapotzalco en México D.F. (paraguas)

- Almacén Celestino Fernández Vallejo, México D.F. (paraguas)

- Fábrica de Remington Rand en Vallejo, México D.F. (paraguas)
  Arquitectura: José Luis Córdoba

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

1956

- Fabrica el León en Vallejo, México D.F. (paraguas)
  Arquitectura: Joaquín y Fernando Álvarez Ordóñez
- Iglesia de San Antonio de las Huertas en Tacuba, México D.F. (*hypar*)
  Arquitectura: Enrique de la Mora y Fernando López Carmona
- Mercado Isabel la Católica, México D.F. (paraguas)
- Caseta de acceso Laboratorios Lederle, México D.F. (paraguas)
  Arquitectura: Alejandro Prieto
- Mercado Anahuac en Tlaloc, México D.F. (paraguas)
- Bodegas Barquin en Vallejo, México D.F. (paraguas)
- Quiosco de Música en Santa Fe, México D.F. (plegada-*hypar*)

1957

- Edificio Texas Instruments en Dallas, EEUU (cúpula *hypar*)
  Arquitectura: O´Neil Ford y Richard Colley
- Fábrica de Aceros de México en Monterrey, Nuevo León (cilíndrica)
  Arquitectura: Javier y Fernando García Narro
- Portal-cochera de la Embajada de los Estados Unidos en Karachi, Paquistan (cilíndrica)
  Arquitectura: Richard Neutra
- Club nocturno La Jacaranda en Acapulco, Guerrero, México (crucería-*hypar*)
  Arquitectura: Juan Sordo Madaleno
- Escultura de acceso a Lomas Tropicales Tequesquitengo, Morelos (plegada-*hypar*)
  Arquitectura: Guillermo Rosell y Manuel Larrosa
- Bodega Negrete en Vallejo, México D.F. (paraguas)
- Restaurante Los Manantiales en Xochimilco, MéxicoD.F. (crucería-*hypar*)
  Arquitectura: Joaquín y Fernando Álvarez Ordoñez
- Bodega Fermar en Vallejo, México D.F.. (paraguas)
- Bodega Olazábal en Vallejo, México D.F. (paraguas)
- Mercado de Abastos Jamaica, México D.F.. (paraguas)
- Capilla abierta de Cuernavaca en Cuernavaca, Morelos, México (*hypar*)
  Arquitectura: Guillermo Rosell y Manuel Larrosa

1958

- Great Southwest Corporation, Texas, EEUU (paraguas)
- Mercado de Chiclayo en Chiclayo, Perú (paraguas)
- Bacardí y Cía (planta embotelladora), carretera México Queretaro, km 34, México D.F. (crucería *hypar*)
  Arquitectura: Sáenz-Cancio-Martín-Álvarez y Gutiérrez / Ingeniería: Luis Torres Landa
- Hotel Casino de La Selva en Cuernavaca, Morelos, México (crucería-*hypar*)
- Convento de San Vicente de Paúl en Coyoacán, México D.F. (*hypar*)
- Plaza de los Abanicos en Cuernavaca, Morelos, México (plegada-*hypar*)
  Arquitectura: Guillermo Rosell y Manuel Larrosa

1959

- Fábrica de productos de aluminio en Puente de Vigas, México (paraguas)
- Bodega Gonzalez Llaven en Vallejo, México D.F. (paraguas)

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

- Bodega Rovel de Gonzalez en Vallejo, México D.F. (paraguas)

- Oficina de Ventas de Verde Valle en Guadalajara, Jalisco, México (crucería *hypar*)

- Iglesia de San José Obrero en Monterrey, Nuevo León, México (*hypar*)
  Arquitectura: Enrique de La Mora y Fernando López Carmona

- Sinagoga en la ciudad de Guatemala, Guatemala (*hypar*)
  Arquitectura: Jorge Montes y Carlos Haeussler

- Capilla de San Vicente de Paúl en Coyoacán, México (*hypar*)
  Arquitecura: Enrique de la Mora y Fernando López Carmona

1960

- Bodegas Díaz Torre en Vallejo, México D.F. (paraguas)

- Fábrica de cerveza Cuauhtemoc en Nogales, Veracruz, México (paraguas)

- Fábrica de cerveza Cuauhtemoc en Guadalajara, Jalisco, México (paraguas)

- Bodega Alfonso Fernandez en Vallejo, México D.F.. (paraguas)

- Iglesia de Santa Mónica en San Lorenzo de Xochimancas, México D.F. (crucería-*hypar*)
  Arquitectura: Fernando López Carmona

1961

- Bodegas Gonzalez Llaven (poniente) en Vallejo, México D.F. (paraguas)

- Deportes Remintong en Cuernavaca, Morelos, México (*hypar*)

1962

- Iglesia de San Pedro Martir en Tlalpan, México D.F. (*hypar*)

- Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe en Madrid, España (*hypar*)
  Arquitectura: Enrique de la Mora y J.R. Azpiazu / Ingeniería: José Antonio Torroja

- Jardín Botánico de Oslo, Noruega (crucería-*hypar*)

1963

- Iglesia en la Florida, México (crucería-*hypar*)

- Bodega Gonzalez (norte) en Vallejo, México D.F.(paragauas)

1964

- Iglesia del Pilar en carretera México-Toluca, km 13, México (*hypar*)

1965

- Gasolinera Emiliano Zapata, México D.F.. (paraguas)

- Gasolinera Bocanegra, México D.F. (paraguas)

- Gasolinera Oxtopulco, México D.F. (paraguas)

- Gasolinera de la avenida de Montevideo, México D.F. (paraguas)

- Gasolinera Vertiz, México D.F. (paraguas)

- Cervecería Montezuma en Orizaba, Veracruz, México (paraguas)

1966

- Gasolinera de la Torre, México D.F. (paraguas)

- Bodega Cruz Blanca en San Juan del Río, Queretano, México (paraguas)

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

- Gasolinera de la calzada de Camarones, México D.F. (paraguas)

- Gasolinera Ceylon, México D.F. (paraguas)

- Iglesia La Florida, Naucalpan, México (crucería *hypar*)

1967

- Cervecería Cuauhtemoc en Nogales, Veracruz, México (paraguas)

- Estación de metro de San Lázaro, México D.F. (*hypar*)
  Arquitectura: Julio Michel Sinner

- Estación de metro Candelaria, México D.F. (paraguas)

1968

- Palacio de los Deportes, México D.F. (cúpula, estructura metálica)
  Arquitectura: Antonio Peyri y Enrique Castañeda

1969

- Fábrica de cerveza Moctezuma en Vallejo, México D.F. (paraguas)

1971

- Ampliación de la Fábrica Bacardí en Cuautilán, México (crucería/*hypar*)

1980-1990

Colaboración con TYPSA en Madrid. Selección de trabajos:

- Cubierta del Estadio de la Universidad Islámica de Riyadh (estructura metálica)

- Cubiertas de la Estación de Servicio del Centro de los Boy Scouts (paraguas)

- Estación de metro de Puerta del Sol, Madrid, España (losa nervada)

1997

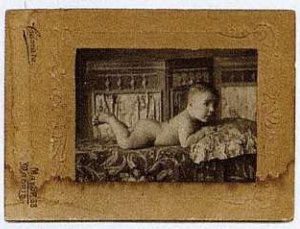
- Colaboración en el proyecto del L'Oceanogràfic, Ciudad de las Artes y las Ciencias, Valencia, España
  Finalización de las obras en 2002 (reproducción de la cubierta laminar de los Manantiales de Xochimilco)

Nota: Las obras impresas en color rojo aparecen referidas en los artículos del presente libro.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

Félix Candela: reseña biográfica



Félix Candela de bebé

Félix Candela (1910-1997), arquitecto de origen español, es uno de los más relevantes protagonistas de la historia de la Arquitectura Moderna. Su abundante legado patrimonial cuenta con más de 800 estructuras laminares de hormigón armado -*Thin Concrete Shells*- construidas fundamentalmente en México durante las décadas de los años 50 y 60.

Formado como arquitecto en Madrid, su ciudad natal, es sin embargo conocido internacionalmente como arquitecto, ingeniero y constructor por haberse autocapacitado para ejercer de forma inseparable estas tres funciones. No en vano, tanto la Arquitectura como la Ingeniería le han galardonado y reconocido como uno de sus más insignes representantes. Félix Candela convirtió su trabajo en un Arte, armonizando en sus cascarones de hormigón armado racionalidad estructural e impactante belleza escultórica.

Su vida transcurrió en España, México y Estados Unidos, obteniendo la nacionalidad de los tres países.

España, origen y formación (Madrid 1910-1939)

Félix Candela Outeriño nació en Madrid (España) el 27 de enero de 1910. Sus años de niñez y pubertad transcurrieron en el centro de la ciudad. Los primeros estudios los realizó en el Centro de Hijos de Madrid, en la Plaza de la Villa, y posteriormente, el bachillerato en el Instituto Cardenal Cisneros, de la calle de San Bernardo. Su familia tenía una zapatería en la calle Mayor nº 79, Calzados Candela.

En el año 1927, inició sus estudios en la Facultad de Ciencias de la Universidad Central, como formación obligatoria previa a su ingreso en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, de la actual Universidad Politécnica de Madrid, en la cual se licenció como arquitecto en el año 1935.

Desde un principio, el joven arquitecto Félix Candela se sintió especialmente atraído por las innovadoras estructuras laminares construidas en Madrid por Eduardo Torroja. En 1936, como premio a su tesis doctoral *La influencia de las nuevas tendencias en las técnicas del hormigón armado sobre las Formas*

Felix Candela: Biographical Brief



Félix Candela con sus padres y sus hermanos Julia y Antonio

Felix Candela (1910-1997), Spanish-born architect, was one of the most prominent drivers of the history of modern architecture. His extensive legacy includes over 800 thin concrete shells built essentially in Mexico in the nineteen fifties and sixties.

While he acquired his architectural training in Madrid, the city of his birth, he was internationally renowned as a self-taught architect, engineer and builder who practised these three professions inseparably. And both disciplines, architecture and engineering, acknowledged him to be one of their most distinguished representatives. Candela turned his three occupations into an art, harmoniously combining structural rationality and striking sculptural beauty in his reinforced concrete shells.

He lived in Spain, Mexico and the United States, and was a citizen of all three.

Spain. Origin and training (Madrid 1910-1939)

Felix Candela Outeriño was born on 27 January 1910 at Madrid, Spain, where he spent his childhood and early youth. His went to the Centro de Hijos de Madrid primary school in the city's Villa Square and earned his baccalaureate at Cardinal Cisneros Institute on San Bernardo Street. His family owned a shoe store on Madrid's Main Street, Calzados Candela.

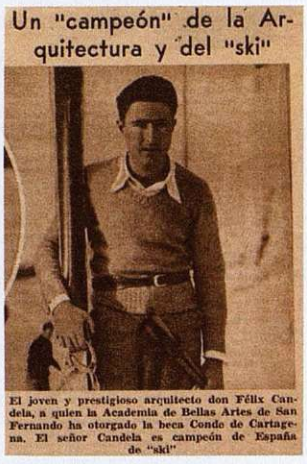
In 1927 he enrolled in the Science Faculty of what was then the Central University as a pre-requisite to his admission to the School of Architecture, where he graduated in 1935.

From the outset, young Felix Candela was particularly drawn to the innovative thin shells that Eduardo Torroja was building in Madrid. In 1936, on the grounds of his Ph.D. thesis, titled *La influencia de las nuevas tendencias en las tecnicas del hormigon armado sobre las formas arquitectonicas* (The effect of new trends in reinforced concrete on architectural forms,) he was awarded a grant by Madrid's Royal Academy of San Fernando. He planned to continue his studies on thin shells in Germany, where D-W, local builders, had erected the worlds' first thin concrete shell in 1922.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



Félix Candela con su mujer y sus hijas, México, 1956



Un "campeón" de la Arquitectura y del "ski"

El joven y prestigioso arquitecto don Félix Candela, a quien la Academia de Bellas Artes de San Fernando ha otorgado la beca Conde de Cartagena. El señor Candela es campeón de España de "ski"

Nota del peródico sobre Félix Candela en 1936

Arquitectónicas, se le concedió una beca, que había solicitado a la Real Academia de San Fernando, para ampliar sus estudios sobre estructuras laminares en Alemania, país en el que, en el año 1922, la empresa D-W había construido la primera *Thin Concrete Shell* del mundo.

El inicio de la Guerra Civil española le hizo desistir de su viaje, y se alistó en el Ejército Republicano. Una vez finalizada la guerra, Félix Candela se exilió a México el mismo 1939.

México, actividad constructora (Cubiertas Ala, 1950-1969)

Desde su llegada a México en 1939, Félix Candela se abrió camino desarrollando diferentes trabajos como delineante, constructor, arquitecto... En 1941 adquirió la nacionalidad mexicana. Su etapa creadora más importante se inició en el año 1950, cuando fundó su propia empresa, Cubiertas Ala, con sus hermanos Antonio (aparejador) y Julia, y con los hermanos arquitectos Fernando y Raúl Fernández Rangel, quienes abandonaron la empresa en 1953. Este mismo año, Félix Candela ocupó una cátedra en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México D.F.

Cubiertas Ala nació con la finalidad de construir cascarones de hormigón armado como cubierta de edificios industriales, pero dado su rápido éxito se construyeron cubiertas laminares de hormigón para todo tipo de edificios: viviendas, iglesias, restaurantes, club nocturnos, gasolineras...

Félix Candela dirigió Cubiertas Ala desde su fundación en 1950 hasta 1969, momento en el cual se hizo cargo su hermano Antonio, quien la dirigió hasta su cierre en 1976. En total se realizaron más de 1.400 proyectos, de los que se construyeron un total de casi 900. En este periodo, Félix Candela se convirtió en el más prolífero proyectista y constructor de cubiertas laminares de hormigón armado del mundo. Aunque en un principio experimentó con diferentes formas geométricas resistentes, la mayor parte de su obra la realizó en base al paraboloide hiperbólico, geometría que le permitió crear cascarones muy diferentes, contando con unas ventajosas características resistentes por su doble curvatura, y además con la ventaja de poder optimizar su coste de ejecución, por tratarse de una superficie reglada, susceptible de ser ejecutada con sencillos encofrados de tablas de madera. Entre las obras más representativas, e internacionalmente conocidas, que Félix Candela realizó con su empresa Cubiertas Ala, destacan: el Laboratorio de Rayos Cósmicos en la Universidad Nacional Autónoma de México



Félix Candela y amigos en la Sierra de Navacerrada

Those plans miscarried with the outbreak of the Spanish Civil War and his enlistment in the Republican Army. After the war was over in 1939, Candela took up exile in Mexico.

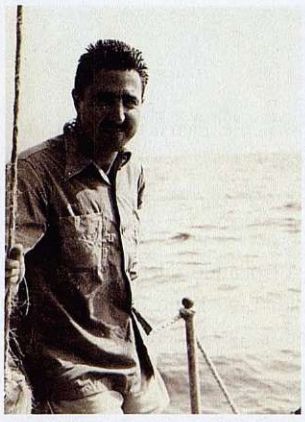
Mexico. Building business (Cubiertas Ala, 1950-1969)

Once in Mexico, Candela worked as a draughtsman, builder, architect... He attained Mexican citizenship in 1941. His most creative years began in 1950, when he founded his own company, Cubiertas Ala, with his brother Antonio (a quantities surveyor) and his sister Julia, and architects Fernando and Raul Fernandez, who sold out in 1953. That same year, Candela was named full professor with the Faculty of Architecture at Mexico City's National Autonomous University.

Cubiertas Ala was founded to build thin concrete shells as roofs over industrial buildings, but in light of their early popularity, it soon began to build shells for all manner of buildings: housing, churches, restaurants, night clubs, petrol stations...

Felix Candela presided Cubiertas Ala from its creation in 1950 until 1969, when he surrendered the reins to his brother Antonio, who ran the company until it closed in 1976. They authored over 1400 designs, nearly 900 of which were built. In those 19 years, Candela became the most prolific thin concrete shell designer and builder in the world. While at first he experimented with different geometries for his structural forms, most of his oeuvre was based on hyerbolic paraboloids, chosen not only for the wide variety of shells they could generate, but also for the strength afforded by their double curvature. A third considerable advantage of these figures was that they optimized construction costs, for as ruled surfaces, they could be built with simple wooden forms. Some of the most representative and internationally renowned works built by Candela's Cubiertas Ala company include: the National Autonomous University of Mexico's Cosmic Rays Laboratory (1951-1952); Medalla Milagrosa Church (1953); High Life Factory at Coyoacan (1954-55); the Mexico City Stock Exchange (1955); San Antonio de las Huertas Chapel at Tacaba (1956); La Jacaranda night club at Acapulco (1957); Los Manantiales restaurant at Xochimilco (1958); Palmira Open Chapel at Cuernavaca (1958); San José Obrero Church at Monterrey (1959); San Vicente de Paul Chapel at Coyoacan (1959); Bacardi Factory at Cuautitlan Izcalli (1960); and the Olympic Games Sports Stadium at Mexico City (1968).

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



Félix Candela en barco, México

(1951-1952), la Iglesia de la Medalla Milagrosa (1953), la Fábrica High Life de Coyoacán (1954-55), la Bolsa de Valores de la Ciudad de México (1955), la Capilla de San Antonio de las Huertas en Tacaba (1956), el Club Nocturno La Jacaranda en Acapulco (1957), el Restaurante Los Manantiales en Xochimilco (1958), la Capilla Abierta de Palmira en Cuernavaca (1958), la Iglesia de San José Obrero en Monterrey (1959), la Capilla de San Vicente Paúl en Coyoacán (1959), la Fábrica Bacardí en Cuautitlán Izcalli (1960), y el Palacio de los Deportes de los Juegos Olímpicos de México (1968).

De 1961 a 1962, Félix Candela presidió en Estados Unidos la Charles Eliot Norton Lectures en la Universidad de Harvard.

Estados Unidos y España (Faceta internacional, 1971-1997)

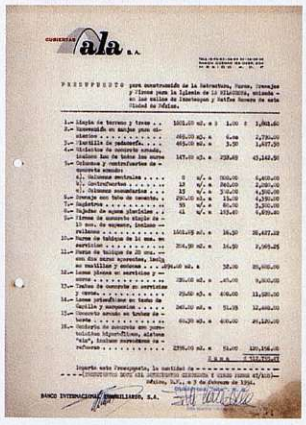
Desde 1955, Félix Candela mantuvo una continua relación con España a través del Instituto Técnico de la Construcción fundado por Eduardo Torroja en 1934. Posteriormente, en 1959, Eduardo Torroja fundó en Madrid la IASS International Association for Shell Structures, que en 1963 nombró a Pier Luigi Nervi y Félix Candela Honorary Members, no sólo por la relevancia internacional de sus obras sino fundamentalmente por el indudable valor de su colaboración y apoyo.

En 1969, Félix Candela visitó España por primera vez, desde que se exiliara a México treinta años antes, pronunciando una conferencia en el Instituto Eduardo Torroja, así como en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, donde años atrás se había licenciado como arquitecto. Desde este momento, Félix Candela recuperó su relación personal con su ciudad natal, adquiriendo posteriormente un piso en su antiguo barrio de Centro, cerca de la Plaza Mayor.

En 1971 fue nombrado catedrático en la Universidad de Illinois, Chicago, donde se trasladó a vivir, obteniendo la nacionalidad americana en 1978. Durante las tres últimas décadas de su vida, Félix Candela viajó de forma continuada a diferentes países, donde era solicitado como asesor, consultor o colaborador de empresas, instituciones internacionales y universidades. Tuvo residencias en Chicago, Nueva York y Raleigh. En 1979 fue asesor de la empresa de arquitectura IDEA Center, con base en Toronto.

En el Anexo 2 se recoge una más extensa selección de obras realizadas por Félix Candela en diferentes países: México, España, Estados Unidos, Arabia Saudí, Colombia, Guatemala, Cuba, Kuwait...

Durante sus últimos veinte años de vida mantuvo una especial relación de trabajo en España. En 1981 empezó a trabajar en Madrid en las oficinas de la empresa TYPSA, situadas entonces en la Plaza



Presupuesto de Cubiertas Ala

From 1961 to 1962 Candela presided in United States the Charles Eliot Norton Lectures at Harvard University.

United States and Spain (International activity, 1971-1997)

Beginning in 1955, Candela maintained ongoing relations with Spain through the Construction Engineering Institute founded by Eduardo Torroja in 1934. Subsequently, in 1959, Eduardo Torroja founded the International Association for Shell Structures (IASS) in Madrid, which named Pier Luigi Nervi and Felix Candela honorary members in 1963. This distinction was in recognition not only of the international significance of their works, but also for the indisputable value of their collaboration and support.

In 1969, Candela returned to Spain for the first time since his exile in 1939 to deliver conferences at the Eduardo Torroja Institute and the Madrid School of Architecture, where he had graduated many years before. From then on, Candela recovered his personal relationship with the city of his birth, where he later purchased a flat in his old neighbourhood in the centre of the city, near the Plaza Mayor or Main Square.

In 1971 he was accepted a full professorship with the University of Illinois at Chicago, where he relocated and obtained American citizenship in 1978. In the last few decades of his life, Candela travelled frequently to many countries as adviser, consultant or collaborator with companies, international institutions and universities. He had homes in Chicago, New York and Raleigh. In 1979 he worked as adviser to the architectural studio IDEA Center, headquartered at Toronto.

In the last twenty years of his life he maintained special working relations with Spain. In 1981 he took employment in Madrid with TYPSA, a company then located at Liceo Square. He took part in national and international designs for nearly 10 years, foremost among which are Madrid's Puerta del Sol underground station; the Master Plan for Riyadh Islamic University Campus; the roofs over its service station and Boy Scout Centre (his last "umbrellas"), and the roofs over the secondary seating in the university stadium and the huge steel structure roof over the stadium itself (spanning 150m between supports).

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Certificado de concesión de la Medalla de Oro en 1961

Telephone: Sloane 7128 & 7129. Telegrams: "Coninst" Knights, London.

The Institution of Structural Engineers.

Founded 1908. Incorporated by Royal Charter 1934.

Secretary:
Major R. F. Maitland, O.B.E., M.I.Struct.E., M.Soc.C.E. (France)

11, Upper Belgrave Street,
London, S.W.1.

GWK/RD AIR MAIL 30th May 1961.

Professor Felix Candela,
Cubiertas Ala S.A.
Ramon Guznan 123,
Desp. 204,
Mexico 4. D.F.

Dear Professor Candela,

I am instructed by my Council to advise you that, at their meeting on the 25th May 1961, it was unanimously resolved that you be awarded the Gold Medal of the Institution in recognition of your distinguished services to structural engineering in connection with the development of concrete shell structures.

The Gold Medal has been awarded in the past to Professor J.F. Baker (1952), Monsieur E. Freyssinet (1957), and Professor Hardy Cross (1958).

The Council would be honoured if you would receive the Medal at the hands of the President, Lt-Col. G.W. Kirkland, and since it is understood that you will be visiting this country to attend a Conference towards the end of June, my President has suggested that Thursday, 29th June 1961 at 7.30 p.m. might be a convenient date and time for the presentation to be effected.

I should be most grateful if you could cable me your acceptance and let me know the programme for your visit to England so that full advantage may be taken of this opportunity to make the presentation. The President will be leaving for a tour of our overseas Branches on the 4th July so that the dates available to him around this period are rather limited.

Yours sincerely,

W.T. Hay

Assistant Secretary.

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

del Liceo, colaborando durante casi diez años en diferentes proyectos nacionales y extranjeros, entre los que destacan la estación de metro de Puerta del Sol de Madrid, el Master Plan del Campus de la Universidad Islámica de Riyadh, las cubiertas de la Estación de Servicio, las cubiertas del Centro de los Boy Scouts, donde construyó sus últimos "paraguas", así como las cubiertas de las tribunas secundarias del Estadio, y la gran cubierta del Estadio, que diseñó con estructura metálica (150m de luz entre apoyos).

En 1992 presidió la Academia Internacional de Arquitectura.

Su último trabajo fue la colaboración en el proyecto del Oceanogràfic de Valencia, con Santiago Calatrava, donde se construyó una réplica de su famoso cascarón de hormigón armado del Restaurante Los Manantiales de Xochimilco, México, que fue construido en 1958. Antes de terminar este proyecto, el 7 de diciembre de 1997, Félix Candela falleció en el hospital Duke en Durham (Carolina del Norte).

PREMIOS Y DISTINCIONES MÁS DESTACABLES

- 1961 Medalla de Oro de Institution of Structural Engineers, Londres
- 1961 Premio Auguste Perret de la Unión Internacional de Arquitectos UIA
- 1963 Honorary Member de la IASS Internactonal Association for Shell Structures
- 1978 Doctor Honoris Causa por la Universidad de Santa María, Venezuela
- 1978 Doctor Honoris Causa por la Universidad de Nuevo México, Alburquerque
- 1979 Honorary Member de la ACI American Concrete Institute, USA
- 1981 Medalla de Oro de la Arquitectura, Consejo Superior de Arquitectos, España
- 1985 Premio Antonio Camuñas de Arquitectura, Madrid, España
- 1994 Doctor Honoris Causa por la Universidad Politécnica de Madrid, España
- 1995 Premio de los Colegios Oficiales de Arquitectos y de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, España

In 1992 he presided the International Academy of Architecture.

His last commission, in conjunction with Santiago Calatrava, was the design for "L'Océanogràfic" at Valencia, which included a replica of his famous thin concrete shell for Los Manantiales restaurant at Xochimilco, Mexico, built in 1958. Before the building was completed, however, Felix Candela died at Duke Hospital in Durham, North Carolina, USA, on 7 December 1997.

OUTSTANDING AWARDS AND DISTINCTIONS

- 1961 Institution of Structural Engineers' Gold Medal, London
- 1961 International Union of Architects' (UIA) Auguste Perret Prize
- 1963 Honorary Member of the International Association for Shell Structures
- 1978 Honorary Doctorate from Santa María University, Venezuela
- 1978 Honorary Doctorate from the University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico, USA
- 1979 Honorary Member of the American Concrete Institute (ACI), USA
- 1981 Architecture Gold Medal, Senior Council of Architects, Spain
- 1985 Antonio Camuñas Award for Architecture, Madrid, Spain
- 1994 Honorary Doctorate from the Polytechnic University of Madrid, Spain
- 1995 Joint Award from the Chartered Institutions of Architects and Civil Engineers of Madrid, Spain

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Acknowledgements

The Polytechnic University of Madrid and the Fundación Juanelo Turriano are grateful for the generosity of the organizations, universities and individuals who have lent part of their own documentation for this exhibition. They also express their thanks to all the authors of this catalogue.

Documentation donated or on loan

Dorothy Davies, Ms Felix Candela
Donation to the Madrid School of Architecture of all the original materials displayed at the 1994 exhibition curated in Madrid by Javier Segui

Candela family/Antonia Candela and Julia Gomez Candela
A number of Felix Candela's original photographs and documents for the exhibition

National Autonomous University of Mexico UNAM/Juan Gerardo Oliva Salinas
Digitized reproductions of Cubiertas Ala drawings and the documentary film produced for the IASS

TYPSA/Pablo Bueno, president
One of Felix Candela's original sketches, shown publicly for the first time on the occasion of this exhibition

Jose Antonio Torroja
Three of Felix Candela's original sketches, shown publicly for the first time on the occasion of this exhibition

Eduardo Torroja Institute for Construction Science/Virtudes Azorin, director of the Publications Department
Issues of Informes de la Construccion dating from 1955 (containing articles by Felix Candela) and digitized pictures

Collaborating organizations

International Association for Shell and Spatial Structures IASS/John F. Abel

CEDEX/Rafael Astudillo

Technische Universität, Berlin, Institut für Bauingenieurwesen/Mike Schlaich

Princeton University/Maria Eugenia Moreyra Garlock and David P. Billington

Cornell University/Jonathan Ochshorn

Università degli Studi del Molise, Facoltà di Ingegneria/Agostino Catalano and Massimiliano Savorra

Department of Architectural Design, Faculty of Architecture, Al-Baath University/Nedal Satouf

National Autonomous University of Mexico/Juan Gerardo Olivas Salinas

University of the Republic, Uruguay/Gonzalo Larrambebere

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Agradecimientos

La Universidad Politécnica de Madrid y la Fundación Juanelo Turriano agradecen la colaboración recibida por las diferentes entidades, universidades y personas, que han cedido parte de sus archivos para la exposición y libro catálogo, así como a todos los autores de los artículos publicados.

Cesión de documentación

Dorothy Davies, viuda de Félix Candela
Cesión a la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, de todo el material original que formó parte de la exposición realizada en el año 1994 en Madrid, y que fue comisariada por Javier Seguí

Familia Candela/Antonia Candela y Julia Gómez Candela
Cesión para la exposición de fotografías y documentos originales de Félix Candela

Universidad Nacional Autónoma de México UNAM/Juan Gerardo Oliva Salinas
Cesión de planos digitalizados de Cubiertas Ala, así como de la película realizada para la IASS

TYPSA/Pablo Bueno, presidente
Cesión de un croquis original de Félix Candela, que se muestra por primera vez en esta exposición

José Antonio Torroja
Cesión de tres croquis originales de Félix Candela, que se muestran por primera vez en esta exposición

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja/Virtudes Azorín, jefa del Departamento de Publicaciones
Cesión de revistas de Informes de la Construcción del año 1955 (publicación de artículos de Félix Candela) y digitalización imágenes

Colaboración

International Association for Shell and Spatial Structures IASS/John F. Abel

CEDEX/Rafael Astudillo

Technische Universität de Berlin, Institut für Bauingenieurwesen/Mike Schlaich

Princeton University/Maria Eugenia Moreyra Garlock y David P. Billington

Cornell University/Jonathan Ochshorn

Università degli Studi del Molise, Facoltà di Ingegneria/Agostino Catalano y Massimiliano Savorra

Department of Architectural Design, Faculty of Architecture, Al-Baath University/Nedal Satouf

Universidad Nacional Autónoma de México/Juan Gerardo Olivas Salinas

Universidad de la República de Uruguay/Gonzalo Larrambebere

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

Créditos

La Universidad Politécnica de Madrid y la Fundación Juanelo Turriano editan este libro, *La conquista de la esbeltez*, con ocasión de la celebración del centenario del nacimiento del arquitecto Félix Candela, y la correspondiente exposición en el Centro Cultural Conde Duque de Madrid.

Coedición	Universidad Politécnica de Madrid y Fundación Juanelo Turriano
Dirección de la edición	Pepa Cassinello
Dibujo de cubierta	Carmen Pinart
Traducción	Margaret Clark (salvo los textos Agostino Catalano y Massimiliano Savorra)
Imágenes y documentos	ARCHIVOS HISTÓRICOS: Rectorado de la Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid ETSAM, Cesión de Dorothy Davies a la ETSAM (1994), Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja de Madrid, TYPSA España, Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, Collection Center for Creative Photography (Universidad de Arizona) y Avery Architectural and Fine Arts Library (Universidad de Columbia) ARCHIVOS PARTICULARES: Juan B. Artigas, familia Candela (Antonia Candela y Julia Gómez Candela), Fernando Cassinello, Eladio Dieste, Heinz Hossdorf, Gonzalo Larrambebere, y José Antonio Torroja FOTOGRAFÍAS ACTUALES EN MÉXICO: Juan B. Artigas, y los alumnos Andrea Tejada Korkowski, Irina Calderón Irazoque y Carlos Cortés
Edición y producción	Ricardo S. Lampreave
Diseño y maquetación	Manuel García
Impresión y encuadernación	LAIMPRENTA CG

© de la edición, Universidad Politécnica de Madrid y Fundación Juanelo Turriano
© de los textos, sus autores
© de las imágenes y documentos, los Archivos originales y sus autores

Los editores han realizado todos los esfuerzos posibles por conocer a los propietarios de los derechos de todas las imágenes que aquí aparecen y por obtener los permisos de reproducción necesarios. Si se ha producido alguna omisión inadvertidamente, el propietario de los derechos o su representante puede dirigirse al editor.

Todos los derechos reservados.

Esta publicación no puede ser reproducida ni en todo ni en parte, ni registrada, ni transmitida por un sistema de recuperación de información en ninguna forma ni en ningún medio, sea mecánico, fotoquímico, electrónico, por fotocopia o cualquier otro.

ISBN: 978-84-920755-8-4
Depósito Legal: V-797-2010

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

L'architettura

CRONACHE E STORIA

direttore Bruno Zevi
ET|AS editrice

Direzione e redazione:
Roma via Nomentana 150 telefono 880.481

Amministrazione e pubblicità
Milano via Mantegna 6 telefono 384.798

Roma, 17 gennaio 1961

Felix Candela
Ramon Guzman 123
desp. 204
Mexico 4 D.F.

Carissimo architetto,

con molto ritardo, dovuto ad un viaggio in Grecia, desidero esprimerLe i miei piu' vivi e affettuosi auguri per il nuovo anno.

Seguo con molto interesse la Sua geniale opera architettonica, e la mia ammirazione per il Suo lavoro e' sempre crescente.

E' molto tempo che non pubblichiamo Sue opere sulla rivista "L'architettura", ed io ho il vivo desiderio di porgerLe un altro omaggio pubblico.

Spero percio' che Lei mi mandi presto materiale di nuove opere, fotografie e disegni, per poter pubblicare un altro capitolo della mirabile vita di Felix Candela.

Riceva i miei piu' cordiali saluti

Bruno Zevi

prof.arch. Bruno Zevi

Cesión/*dealership* Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

TEMAS *TOPICS*

T1 Contexto internacional de las *Thin Concrete Shells*
Internacional Context of the Thin Concrete Shells

T2 El legado de Félix Candela
Felix Candela´s Legacy

T3 Forma estructural, cálculo y construcción
Structural Form, Calculation and Construction

T4 Geometría
Geometry

T5 Material: Hormigón armado
Material: Reinforced Concrete

T6 Félix Candela
Felix Candela

Exposición conmemorativa *Commemorative Exhibition*

FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO



LA CONQUISTA DE LA ESBELTEZ *THE ACHIEVEMENT OF SLENDERNESS*

T1 PEPA CASSINELLO • MIKE SCHLAICH T2 MARIA EUGENIA MOREYRA GARLOCK • DAVID P. BILLINGTON
JUAN GERARDO OLIVA SALINAS • JOHN F. ABEL • AGOSTINO CATALANO • MASSIMILIANO SAVORRA • ANTONIO LAMELA
PABLO BUENO T3 JOSÉ CALAVERA RUIZ • ENRIQUE GONZÁLEZ VALLE • FLORENCIO J. DEL POZO VINDEL
JOSÉ MARÍA GOICOLEA • GONZALO LARRAMBEBERE • JAVIER MANTEROLA • JOSÉ ANTONIO TORROJA
T4 CARMEN GARCÍA REIG T5 RAFAEL TALERO T6 RICARDO AROCA HERNÁNDEZ-ROS • ANTONIA CANDELA
JULIA GÓMEZ CANDELA • JUAN B. ARTIGAS • FERNANDO SERRANO MIGALLÓN • JOSÉ ÁVILA MÉNDEZ

PEPA CASSINELLO ed.



FUNDACIÓN JUANELO TURRIANO